

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 21. Выпуск 5
2026**

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

Сквозной номер 210

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 21. Issue 5
2026**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 24-76
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	29.05.2026.
Подписан в свет	29.05.2026.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 22,79. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 158

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, главный научный сотрудник научно-образовательного центра «Гео-техника», 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 Дельфты, 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 Войчицкий, 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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Алла Русланбековна Табекова

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Перевод на английский язык: Ольга Валерьевна Юденкова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Алина Юрьевна Байкова

Алейникова Юлия Зиновьевна

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 Федеральное государственное бюджетное учреждение «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 архитектурно-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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	29.05.2026

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)”, 2026

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 Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Alla R. Tabekova*

Corrector: *Oksana V. Ermikhina*

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova*

Layout: *Alina Y. Baykova*

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

Yulia Z. Aleynikova

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

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

Л.Ю. Ступишин, М.Л. Мошкевич

Предельное состояние стержневой конструкции в состоянии самонапряжения. 689

А.О. Ильюшенко

**Устойчивость жестко заделанной консоли двутаврового сечения с двумя осями симметрии
с переменной высотой стенки 701**

А.В. Мищенко, М.С. Вешкин

**Реализация эквипотенциальных поверхностей в структурно-неоднородных стержнях при вариационных
постановках задач оптимизации 714**

А.Г. Тамразян, В.И. Черник

**Параметры сейсмостойкости железобетонных каркасных зданий после пожара с учетом
многовариантности огневого воздействия. 725**

И.В. Сугоняев, Я.А. Пронозин, Е.П. Брагарь

Усиление грунтовых оснований методом гидроразрыва при горизонтальной проходке 742

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В.В. Кравченко

Прогнозирование жесткостных характеристик бетона на основе аналитической гомогенизации 752

К. Ками, С.М. Усачев, Н.А. Белькова

**Оптимизация составов коррозионно-стойких бетонов по виду и расходу добавок-модификаторов
для условий Республики Бурунди. 763**

Н.И. Шестаков, В.А. Дзуцев, И.Р. Полев

Морфология микродефектов в асфальтобетонах на ранней стадии эксплуатационной деградации 772

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

В.И. Теличенко, М.Д. Васильев, Н.С. Рудь, Н.Г. Канев

**Сравнительный анализ российских, зарубежных и международных нормативных
требований к звукоизоляции воздушного шума в гражданских зданиях 781**

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Т.Н. Магера, С. Цюй

**Требования работодателей как инструмент управления персоналом в современных строительных
организациях. 801**

С.Е. Манжилевская

Контроль производительности труда на строительной площадке с помощью алгоритмов машинного обучения. . 821

Е.В. Кац, Н.Е. Смелницкая

**Формирование сметной документации на основе цифровой информационной модели для целей
государственной экспертизы 833**

А.Б. Моттаева

**Организационно-технологическое моделирование модульной сборки атомной электростанции
для сокращения инвестиционно-строительного цикла. 849**

Требования к оформлению научной статьи 863

CONTENTS

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

Leonid Yu. Stupishin, Mariia L. Moshkevich

Limit state of a bar structure under self-stress conditions. 689

Alexander O. Ilyushenkov

Stability of a Doubly Symmetric Web-Tapered I-Beam

Cantilever 701

Andrey V. Mishchenko, Maxim S. Veshkin

Realization of equipotential surfaces in structurally inhomogeneous rods in variational formulations

of optimization problems. 714

Ashot G. Tamrazyan, Vladimir I. Chernik

Seismic resistance parameters of reinforced concrete frame buildings after fire considering multiple fire

exposure scenarios 725

Ivan V. Sugonyaev, Yakov A. Pronozin, Elena P. Bragar

Soil foundation reinforcement using hydraulic fracturing during horizontal drilling 742

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Valentin V. Kravchenko

Prediction of concrete stiffness characteristics using analytical homogenization 752

Chilperic Kami, Sergey M. Usachev, Natalia A. Belkova

Optimization of corrosion-resistant compositions concrete by type and consumption of additive modifiers

for the conditions of the Republic of Burundi 763

Nikolay I. Shestakov, Vladimir A. Dzutsev, Ivan R. Polev

Morphology of microdefects in asphalt concrete at the early stage of operational degradation 772

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Valeriy I. Telichenko, Mikhail D. Vasiliev, Nikita S. Rud', Nikolay G. Kanev

Comparative analysis of Russian, foreign, and international regulatory requirements for airborne sound

insulation in civil buildings 781

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Tatiana N. Magera, Xiaohan Qu

Employer requirements as a personnel management tool in modern construction organizations 801

Svetlana E. Manzhilevskaya

Monitoring labour productivity on a construction site using machine learning algorithms 821

Elena V. Kats, Nina E. Smelnitskaya

Preparation of cost estimate documentation based on a digital information model for the purposes

of state expertise 833

Asiat B. Mottaeva

Organizational and technological modelling of NPP modular assembly for reducing the construction

investment cycle 849

Requirements for research paper design 863

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).

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

объявляет о возможности подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора наук по теме: «Градостроительное планирование производственных территорий поселений в региональных системах расселения» по научной специальности 2.1.13. «Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов».

Конкурсный отбор состоится на заседании Президиума Научно-технического совета НИУ МГСУ 16.06.2026 в 14:00.

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

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.04:531.64

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.689-700

Предельное состояние стержневой конструкции в состоянии самонапряжения

Леонид Юлианович Ступишин¹, Мария Леонидовна Мошкевич²

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

² Филиал «Академия ТОП Курск» Автономной некоммерческой организации дополнительного профессионального образования «Академия ТОП»; г. Курск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Предлагается развитие теории предельного состояния конструкций. До настоящего времени каждый вид предельного состояния описывается отдельной теорией. Раскрывается методика постановки задач предельного состояния конструкций, позволяющая представить все возможные формулировки с единых позиций, на основе единой математической модели. Следствием является методика определения остаточной несущей способности в детерминированном виде, тогда как существующие подходы дают возможность оценить остаточную несущую способность конструкции только в вероятностном виде.

Материалы и методы. В основе теории лежат несколько основных предпосылок. Поля внешних воздействий на конструкцию и поле деформаций несущей системы имеют разное происхождение и законы существования. Экстремальные величины параметров деформируемой конструкции ограничены предельными величинами внешних воздействий. Экстремальные величины параметров поля деформаций могут быть найдены из задачи на собственные значения для матриц жесткости или податливости конструкции. Результат решения этой задачи совпадает с решением задачи оптимизации конструкции. Решение задачи на собственные значения дает возможность получить глобальный экстремум и учесть решения на границе области допустимых значений. Постановка задачи позволяет найти максимально и минимально возможные значения реактивного отклика конструкции на внешние воздействия. Последние формируют область допустимых значений для внутренних параметров несущей системы. Разница между предельными параметрами и работой внешних сил дает величину остаточной несущей способности конструкции.

Результаты. Рассматривается задача расчета двух стержневой системы. Показано, что предельные состояния 1-й и 2-й группы могут быть представлены в виде эллипса предельных состояний. Определены величины остаточной несущей способности в перемещениях, усилиях и энергии деформации.

Выводы. Предложена новая постановка задач о предельном состоянии конструкций. Методика расчета позволяет найти не только предельно возможные параметры конструкции, но и остаточную несущую способность конструкции в детерминированном виде.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: предельное состояние, самонапряжение, критические уровни энергии, энергетические методы, матричные методы, стержневая конструкция

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ступишин Л.Ю., Мошкевич М.Л. Предельное состояние стержневой конструкции в состоянии самонапряжения // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 689–700. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.689-700

Автор, ответственный за переписку: Леонид Юлианович Ступишин, StupishinLyu@mgsu.ru.

Limit state of a bar structure under self-stress conditions

Leonid Yu. Stupishin¹, Mariia L. Moshkevich²

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

² Branch "TOP Academy Kursk" of the Autonomous Non-Commercial Organization of Continuing Professional Education "TOP Academy"; Kursk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper deals with the development of the theory of the limit state of structures. The method is proposed for determining the limit state of the structure, allowing to describe all possible formulations from a single position, based on a single mathematical model.

Materials and methods. The theory is based on several basic assumptions. The fields of external actions on the structure and the deformation field of the supporting system have different origins and laws of existence. The extreme values of the parameters of the deformable structure are limited by the limiting values of external influences. The extreme values of the deformation field parameters can be found from the eigenvalue problem for the stiffness or flexible matrices of the structure. The result of solving this problem coincides with the solution of the design optimization problem. Solving the eigenvalue problem makes it possible to find the global extremum and take into account solutions at the boundary of the feasible region. The formulation of the problem makes it possible to find the maximum and minimum possible values of the reactive response of the structure to external influences. These values form the domain of admissible values for the internal parameters of the supporting system. The difference between the limiting parameters and the work of external forces gives the value of the residual bearing capacity of the structure.

Results. The problem of calculating a two-bar system is considered. The results are given in the form of an ellipse of limit states, and the values of residual bearing capacity in displacements, forces and deformation energy.

Conclusions. The new formulation of limit states problems is proposed. The calculation method allows finding not only the maximum possible parameters of the structure, but also the residual bearing capacity of the structure in a deterministic form.

KEYWORDS: limit state, self-stress, critical energy levels, energy methods, matrix methods, bar structure

FOR CITATION: Stupishin L.Yu., Moshkevich M.L. Limit state of a bar structure under self-stress conditions. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):689-700. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.689-700 (rus.).

Corresponding author: Leonid Yu. Stupishin, StupishinLYU@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на значительный прогресс в области теории расчета конструкций в строительстве, вряд ли можно говорить о завершенности изучения понятия «предельное состояние». Нормативная литература определяет «предельное состояние конструкции» как состояние, «после достижения которого, невозможна или нецелесообразна дальнейшая нормальная эксплуатация конструкций». Почти каждому виду предельных состояний соответствует своя теория. Большое внимание уделяется исследованию предельных состояний конструкций, работающих в пластической стадии [1–8], стадии ползучести [9], при хрупком разрушении от статических и сейсмических воздействий [10–17]. Предельные состояния конструкций при температурных воздействиях так же находятся в фокусе исследований [18–20]. Активно ведется поиск новых подходов к формулированию понятия «предельное состояние» [21–28], однако единый подход к описанию предельного состояния конструкции отсутствует. Превалирующей остается вероятностная формулировка как в оценке надежности конструкций зданий и сооружений [29–34], так и их остаточного ресурса [35].

В рамках постановки задачи строительной механики на основе минимума полной энергии деформации [36] едва ли можно построить теорию предельных состояний конструкций на единой физико-математической основе. Гипотезы первой группы предельных состояний связаны с вопросами потери прочности, устойчивости, появлением и развитием трещин, усталостью материала, упомянутыми выше. Гипотезы второй группы рассматривают такое состояние, которое не удовлетворяет эксплуатационным требованиям к конструкциям здания [37].

Такое толкование явления потери несущей способности вызывает серьезные проблемы при формализации предельных состояний какими-либо математическими и физическими моделями с единых позиций. Поэтому и существует мнение об отсут-

ствии теории предельных состояний как систематизированного подхода к предмету изучения.

В статье развивается подход, основанный на разделении полей деформации конструкции и полей внешних воздействий. В неравенствах, описывающих условия предельного состояния конструкции [38–40]:

$$\xi_{extr} \leq \xi_p; \Phi_{extr} \leq \Phi_p; U_{extr}(\xi, \Phi) \leq U_p, \quad (1)$$

в левой части содержатся экстремальные величины энергии деформации U_{extr} или обобщенных параметров перемещений ξ_{extr} и усилий Φ_{extr} . Экстремальные величины внутренних параметров поля деформаций конструкции определяются формой конструкции, геометрическими и механическими характеристиками, а также условиями опирания. Их физический смысл — величины главных значений реактивного отклика конструкции на возможные внешние воздействия.

В правой части выражения (1) располагаются величины параметров — ограничений U_p, ξ_p, Φ_p , которые, как правило, предписываются нормативными документами, расчетными процедурами определения предельных величин нагрузок (например, сейсмических) или экспериментальными данными.

Предельное состояние конструкции отождествляется с состоянием самонапряжения конструкции на критическом уровне энергии, параметры которого находятся в левой части неравенств (1). В правой части может быть величина, ограничивающая параметры деформируемой несущей системы, по предельным состояниям как первой, так и второй группы. Это соответствует факту независимого существования параметров внутреннего поля деформаций и полей внешних воздействий, порождаемых различными физическими явлениями. Математическая модель задач прочности, жесткости, как и устойчивости и динамики несущих систем, представляет собой задачу на собственные значения.

Экстремальные величины параметров конструкции позволяют найти не только максимально (мини-

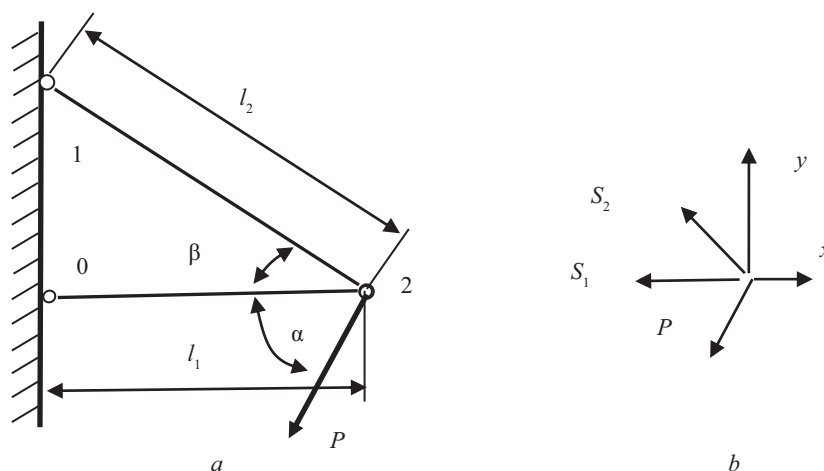


Рис. 1. Расчетная схема задачи оптимизации стержневой несущей системы

Fig. 1. Computational scheme for the optimization problem of a bar load-bearing system

мально) возможные их величины, но и остаточную несущую способность конструкции в детерминированном (не вероятностном) виде.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В традиционной (классической) строительной механике для конструкции заданной геометрии, подверженной действию внешней нагрузки, различают три вида постановки задач: поверочная, проектная и оптимизационная. Сравним классический подход с развешиваемым авторами статьи на примере двух стержневой системы, показанной на рис. 1. Предельные состояния конструкции удобнее представить с помощью оптимизационной задачи по установлению максимальных величин узловых перемещений и реакций.

Оптимизационная задача

Для несущей системы, представленной на рис. 1, с заданным углом наклона стержней и условиями

опирания, требуется найти максимально (минимально) возможные перемещения узла 2 и реактивный отклик конструкции. Соотношение длин стержней и соотношение площадей поперечных сечений задано. Материал одинаковый.

Поскольку перемещения считаются бесконечно малыми, план перемещений содержит прямые, перпендикулярные возможным удлинениям (укорочениям) стержней (рис. 2).

Все возможные перемещения узла 2, обозначенные как AB , ограничены предельно допустимой величиной Δ_{AB} . Эти перемещения для любого состояния деформированной системы определяются из группы однородных уравнений совместности деформаций. Несложно убедиться из решения задач для разных направлений заданной в узле 2 силы (см. рис. 1), что проверкой правильности решения будет условие для бесконечно малых перемещений стержней:

$$\delta_{0-2}^2 + \delta_{1-2}^2 = \Delta_{AB}^2 \quad (2)$$

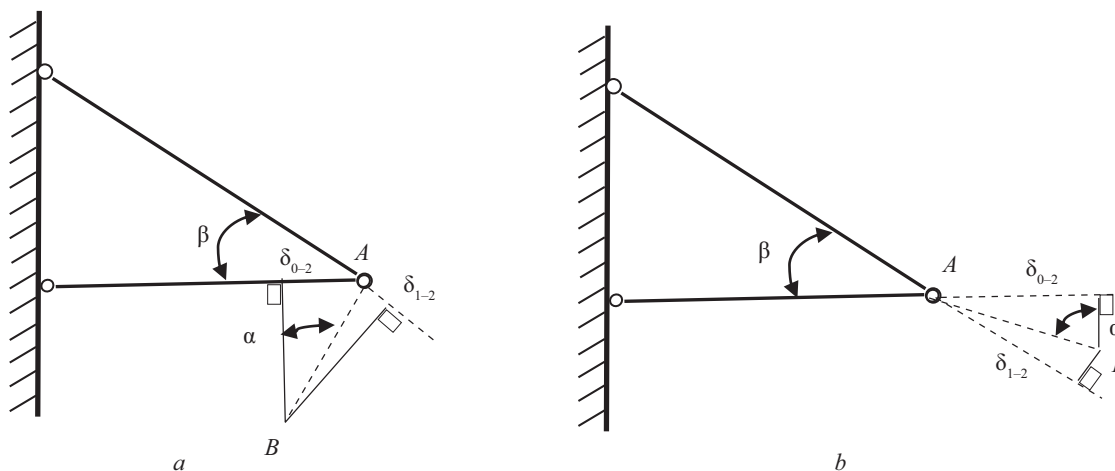


Рис. 2. Некоторые варианты планов бесконечно малых возможных перемещений двухстержневой деформируемой системы

Fig. 2. Some variants of plans for infinitesimally small possible displacements of a two-bar deformable system

которое в работах [28, 29] авторы настоящей статьи называли условием нормировки.

Перемещения характерного узла фермы можно найти с помощью интеграла Мора:

$$\delta_{iF} = \sum_{k=1}^n \int_0^{l_k} \frac{N_{kF} \bar{N}_{ki}}{E_k A_k} dx; \quad k = 1, 2; \quad i = 1, 2, \quad (3)$$

где N_{kF} — продольное усилие в k -м элементе от нагрузки; \bar{N}_{ki} — усилие от единичной силы, приложенной в направлении i .

Усилия в стержнях, вызванные реактивной силой системы, находятся из рассмотрения узла на рис. 1, b :

$$\begin{aligned} \Sigma X = 0; & -N_1 - N_2 \cos \beta - P \cos \alpha = 0; \\ \Sigma Y = 0; & N_2 \sin \beta - P \sin \alpha = 0; \\ N_2 = P \sin \alpha / \sin \beta; & N_1 = -P(\sin \alpha \cos \beta / (\sin \beta + \cos \alpha)). \end{aligned} \quad (4)$$

Усилия в стержнях от горизонтального направления единичной силы:

$$\begin{aligned} \Sigma X = 0; & -\bar{N}_{1r} - \bar{N}_{2r} \cos \beta + 1 = 0; \\ \Sigma Y = 0; & \bar{N}_{2r} \sin \beta = 0; \\ \bar{N}_{2r} = 0; & \bar{N}_{1r} = 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Усилия в стержнях от вертикального направления единичной силы:

$$\begin{aligned} \Sigma X = 0; & -\bar{N}_{1b} - \bar{N}_{2b} \cos \beta = 0; \\ \Sigma Y = 0; & \bar{N}_{2b} \sin \beta - 1 = 0; \\ \bar{N}_{2b} = 1 / \sin \beta; & \bar{N}_{1b} = -\cos \beta / \sin \beta = -\operatorname{ctg} \beta. \end{aligned} \quad (6)$$

Горизонтальное перемещение узла 2 от реактивного усилия системы определяется по формуле Мора:

$$\delta_r = \frac{N_1 \bar{N}_{1r} l_1 + N_2 \bar{N}_{2r} l_2}{E_1 A_1} - \frac{l_1 R (\operatorname{ctg} \beta \sin \alpha + \cos \alpha)}{E_1 A_1}. \quad (7)$$

Вертикальное перемещение узла 2 от реактивного усилия системы:

$$\begin{aligned} \delta_b = & \frac{N_1 \bar{N}_{1b} l_1 + N_2 \bar{N}_{2b} l_2}{E_1 A_1} + \\ & \frac{l_1 R}{E_1 A_1} [(\operatorname{ctg} \beta \sin \alpha + \cos \alpha) \operatorname{ctg} \beta + \\ & + \frac{l_2 E_1 A_1}{l_1 E_2 A_2} \frac{1}{\sin^2 \beta} \sin \alpha]. \end{aligned} \quad (8)$$

После учета соотношений длин, поперечных сечений стержней и введения безразмерных величин перемещений получим:

$$\begin{aligned} \bar{\delta}_r = \delta_r \frac{EA}{lR}; & \bar{\delta}_b = \delta_b \frac{EA}{lR}; \\ b = \operatorname{ctg} \beta; & b_1 = \frac{1}{\cos \beta \sin^2 \beta}; \quad \eta = \frac{E_1 A_1}{E_2 A_2}; \end{aligned}$$

$$\bar{\delta}_r = -(b \sin \alpha + \cos \alpha); \quad (9)$$

$$\bar{\delta}_b = -[(b \sin \alpha + \cos \alpha)b + \eta b_1 \sin \alpha].$$

Безразмерная величина перемещения узла 2 определится как:

$$\begin{aligned} \bar{\delta}^2 = \bar{\delta}_r^2 + \bar{\delta}_b^2; \\ \bar{\delta} = \sqrt{(b \sin \alpha + \cos \alpha)^2 + [(b \sin \alpha + \cos \alpha)b + \eta b_1 \sin \alpha]^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Далее необходимо записать условие для установления экстремальных величин перемещений:

$$\frac{d\bar{\delta}}{da} = 0 \quad (11)$$

и найти соответствующие углы наклона экстремальных перемещений к горизонтали, по ним вычислить перемещения узла и узловую реакцию системы.

Критические уровни энергии деформации

Покажем методику решения задачи (рис. 3) по поиску самонапряженных состояний несущей системы на критических уровнях энергии. Для этого задаем вариации усилий (перемещений) в направлении первоначально выбранных степеней свободы в обобщенных усилиях $\delta \Phi_i$ или перемещениях $\delta \xi_i$.

На рис. 3, b показан вырезанный узел и возможные направления внутренних усилий, вызываемые вариациями силовых или кинематических воздействий.

Состояние самонапряжения любой деформируемой системы выявляется через группу уравнений строительной механики представленных в форме метода сил или перемещений [38]:

$$[\mathbf{L}]\{\delta \mathbf{R}\} = \{\delta \xi\}, \quad (12)$$

где $[\mathbf{L}]$ — матрица податливости конструкции; $\{\delta \mathbf{R}\}$ — вариация вектора узловых реакций несущей системы; $\{\delta \xi\}$ — бесконечно малый вектор узловых вариаций обобщенных перемещений узла 2 несущей системы, который в условиях самонапряжения конструкции или отсутствия внешней нагрузки можно принять нулевым.

Экстремальные состояния конструкции на критических (предельных) уровнях энергии могут быть найдены как собственные значения матрицы податливости конструкции:

$$[\mathbf{L}]\{\delta \mathbf{R}\} = [\lambda^1]\{\delta \mathbf{R}\}, \quad (13)$$

где $[\lambda^1]$ — собственные значения матрицы податливости, определяющие экстремальные величины перемещений, матрица собственных векторов $[\varphi^1]$ образует с единичной величиной вариации реактивных усилий $\{\mathbf{I}\}$ векторную матрицу узловой реакции $\{\delta \mathbf{R}\} = [\varphi^1]\{\mathbf{I}\}$ несущей системы.

Матрицу податливости удобно находить через матрицу жесткости несущей системы:

$$[\mathbf{L}] = [\mathbf{K}]^{-1}, \quad (14)$$

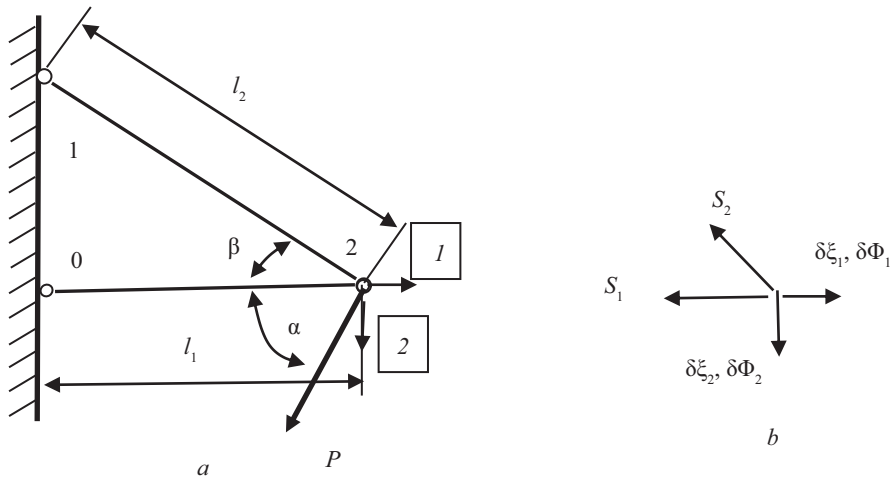


Рис. 3. Двухстержневая деформируемая система

Fig. 3. Two-bar deformable system

а матрицу жесткости конструкции вычисляют по статической матрице $[A]$ (см. уравнения (4)) и матрице внутренней жесткости $[C]$ конструкции:

$$[K] = [A][C][A]^T, \quad (15)$$

где T — транспонирование.

Из двойственных к уравнениям (12) соотношений следует:

$$[K]\{\delta\xi\} = \{\delta R\}, \quad (16)$$

откуда имеем соотношения:

$$[K]\{\delta\xi\} = [\lambda^K]\{\delta\xi\}, \quad (17)$$

где матрица собственных векторов $[\varphi^K]$ образует с единичной величиной вариации узловых перемещений $\{I\}$ векторную матрицу узловых перемещений $\{\xi\} = [\varphi^K]\{I\}$ несущей системы. Векторная матрица $[\varphi^K]$ собственных векторов задачи, как будет видно далее, имеет физический смысл углов наклона узловой реакции по отношению к первоначально выбранным направлениям степеней свободы, которые выше были обозначены как α .

Как известно [39, 40], векторы $\{R\}$ и $\{\xi\}$ образуют ортогональную систему, а значения углов в векторных матрицах $[\varphi^K]$ и $[\varphi^L]$ отличаются знаками.

Условия предельного состояния

На полученных экстремальных величинах векторов узловых перемещений $\{\xi\} = \{\delta\}$ и усилий $\{R\}$, как на осях, можно построить эллипсы предельных состояний конструкции (рис. 4).

С помощью эллипсов можно находить величины предельных перемещений (реакций) узла [40] в любом, интересующем нас направлении. Например, предельная величина перемещения узла от сосредоточенной силы, приложенной под углом α (см. рис. 1, а), может быть найдена по формуле:

$$\delta_{extr}^\alpha = \frac{\delta_{max} \delta_{min}}{\sqrt{\delta_{max}^2 (\sin\alpha)^2 + \delta_{min}^2 (\cos\alpha)^2}}. \quad (18)$$

В случае отыскания реактивных величин внутренних усилий в формуле (16) следует заменить перемещения на узловые реакции конструкции.

Остаточная величина несущей способности в перемещениях δ_{res} и реактивных усилиях R_{res} определится как:

$$\Delta_{res} = \delta_{extr} - \delta_p; R_{res} = R_{extr} - P, \quad (19)$$

где δ_p — перемещение узла, вызванное внешней нагрузкой; P — величина внешней нагрузки.

Максимально возможная энергия деформации несущей системы может быть найдена по формулам:

$$U^K = \{\delta_{extr}\}^T [K] \{\delta_{extr}\} / 2;$$

$$U^L = \{R_{extr}\}^T [L] \{R_{extr}\} / 2. \quad (20)$$

Работа внешней силы определяется следующим образом:

$$W_P^K = \{\delta^P\}^T [K] \{\delta^P\} / 2;$$

$$W_P^L = \{P\}^T [L] \{P\} / 2. \quad (21)$$

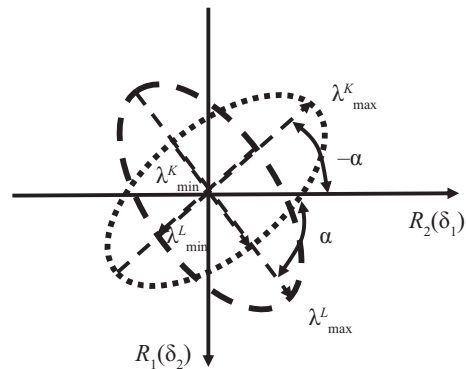


Рис. 4. Эллипсы внешней жесткости (точки) и внешней податливости (пунктир) несимметричной системы

Fig. 4. Ellipses of external stiffness (solid lines) and external compliance (dotted lines) for an asymmetric system

В случае установления остаточной несущей способности конструкции от нагрузки, приложенной в направлении α , имеем энергию:

$$U_{res} = U_{\alpha}^{KL} - W_p. \quad (22)$$

Энергия остаточной несущей способности может быть вычислена как:

$$\begin{aligned} U_{\alpha}^K &= \{\delta_{res}^{\alpha}\}^T [\mathbf{K}] \{\delta_{res}^{\alpha}\} / 2; \\ U_{\alpha}^L &= \{\mathbf{R}_{res}^{\alpha}\}^T [\mathbf{L}] \{\mathbf{R}_{res}^{\alpha}\} / 2. \end{aligned} \quad (23)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оптимизационная задача

Примем следующие исходные величины $\beta = 60^\circ$, $l_1 = l$, $l_2 = l_1 / \cos \beta$, $E_1 = E_2 = E$, $A_1 = A$, $A_2 = 1,5A$. Решим задачу (11) графически. На рис. 5 показан график изменения перемещений в зависимости от угла α .

Максимальная податливость достигается при угле наклона реакции системы к горизонтالي $\alpha \approx 0,392$ рад и составляет в безразмерном виде $\bar{\delta} \approx 2,35$. Используя обозначения, принятые в выражении (9), получаем величину реакции конструкции на действие нагрузки под углом $\alpha \approx 0,392$ рад в виде $\bar{R} = 1/\bar{\delta} = 0,425$; $R = 0,425 \frac{EA}{l}$. Перемещения узла изменяются с периодом $\pi/2$ от максимальных до минимальных значений. Поэтому график можно представить в виде эллипса предельных перемещений (см. рис. 4), который описывает предельные величины перемещений узла при текущем положении нагрузки под углом α [39].

Очевидно, что в случае более сложных расчетных схем несущих конструкций задача оптимизации приведет к сложным выкладкам и использованию итерационных процедур решения нелинейной задачи.

Критические уровни энергии

Условия самонапряжения конструкции на критическом уровне энергии позволяют получить те же результаты в алгоритмичном, общем и простом виде. Учитывая заданные соотношения между жесткостями стержней, имеем матрицу внутренней жесткости в виде:

$$[\mathbf{C}] = \frac{EA}{l} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0,75 \end{vmatrix}. \quad (24)$$

Матрица внешней жесткости определится как:

$$[\mathbf{K}] = \frac{EA}{l} \begin{vmatrix} 1,188 & 0,3248 \\ 0,3248 & 0,5625 \end{vmatrix}. \quad (25)$$

Матрица податливости конструкции запишется следующим образом:

$$[\mathbf{L}] = \frac{l}{EA} \begin{vmatrix} 1 & -0,5774 \\ -0,5774 & 2,111 \end{vmatrix}. \quad (26)$$

Собственные значения матрицы податливости:

$$[\lambda^L] = [\delta_{\min}^L] = \frac{l}{EA} \begin{vmatrix} 0,7543 & 0 \\ 0 & 2,357 \end{vmatrix}. \quad (27)$$

Векторная матрица собственных значений:

$$[\alpha^L] = \begin{vmatrix} -0,9202 & 0,3915 \\ -0,3915 & -0,9202 \end{vmatrix}. \quad (28)$$

Несложно видеть совпадение решений, полученных на основе двух различных постановок задач.

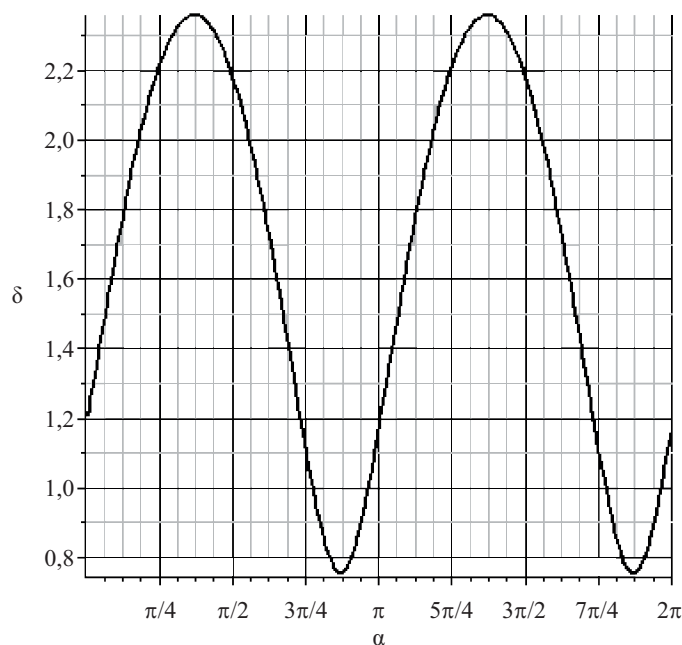


Рис. 5. Определение экстремальных величин перемещений

Fig. 5. Determination of Extreme Displacement Values

Однако второй способ дает возможность программирования предложенной методики в машинных кодах для различных видов несущих систем по единому алгоритму.

Условия предельного состояния

Пусть условие выхода связи несущей системы из работы на нагрузку определяется достижением в одном из стержней напряжения $\sigma_{cr} = 210$ МПа. Заданная величина внешней силы $P = 0,8$ кН, с углом наклона к горизонтали $\varphi = \pi/4$. Модуль упругости материала $E_1 = E_2 = 2 \cdot 10^5$ МПа и геометрические характеристики $A_1 = 0,785 \cdot 10^{-4}$ м², $A_2 = 1,178 \cdot 10^{-4}$ м², $J_1 = 0,04906 \cdot 10^{-8}$ м⁴, $l_1 = 1$ м, $l_2 = 2$ м.

1. Внутренние усилия от составляющих заданной нагрузки $\{P_{1,2}\} = [-565,7; 565,7]^T$ (Н), согласно выражению для определения внутренних усилий в стержнях конструкции:

$$\begin{aligned} \{N_{1,2}^p\} &= -[C][A]^T[L]\{P\} = \\ &= [-892,3; 653,2]^T \text{ (Н)}, \end{aligned} \quad (29)$$

напряжения в стержнях от внешней нагрузки $\sigma_1 = -11,37$ (МПа), $\sigma_2 = 5,545$ (МПа). Проверяем устойчивость сжатого стержня по формуле Эйлера $F_{cr} = \pi^2 EJ_1/l_1^2 = 969$ (Н). Потери устойчивости от заданной внешней нагрузки нет.

Перемещение от заданной нагрузки в направлении начально выбранных степеней свободы (9) составляет $\{\delta_{1,2}\} = [-0,5683; 0,9687]^T \cdot 10^{-4}$ (м). Суммарное перемещение $\delta_p = 0,1123 \cdot 10^{-3}$ (м) направлено под углом $30,4^\circ$ к горизонтальной начальной оси.

2. Исходя из условий самонапряжения конструкции определяем слабое звено конструкции, вычисляя усилия в стержнях от узлового реактивного вектора конструкции.

Максимальное узловое перемещение конструкции согласно выражениям (27), (28) рассчитывается по формуле:

$$\{Z_{\max}\} = [\lambda^L_{\max}] \{\phi^L\}, \quad (30)$$

и дает величины $\{Z_{1,2}^{extr}\} = \{-0,4805; 1,501\}^T \cdot 10^{-7}$ (м) с углом наклона направления перемещений $-52,7^\circ$.

Продольные деформации стержней определяются по формуле:

$$\{\Delta_{\max}\} = -[A]^T \{Z_{\max}\}. \quad (31)$$

Продольные усилия в стержнях совпадают с полученными в выражении (29):

$$\{N\} = [C] \{\Delta_{\max}\}. \quad (32)$$

Нормируем по наибольшей величине компоненты вектора внутренних усилий несущей системы и присваиваем предельное значение максимально возможной продольной силе. Остальные величины получаем согласно нормированному вектору: $\{N_{extr}\} = \{-16\ 485; 12\ 068\}^T$ (Н).

Запас несущей способности по внутренним усилиям составит по формуле (19):

$$\begin{aligned} \{N_{res}\} &= \{N_{extr}\} - \{N_p\} = \\ &= \{-15\ 593; 11\ 415\}^T \text{ (Н)}. \end{aligned} \quad (33)$$

Очевидно, что с учетом возможности потери устойчивости первым стержнем величина первой компоненты вектора станет меньше и составит -77 Н.

Остаточная величина узловых перемещений с учетом возможности потери устойчивости может быть найдена как:

$$\begin{aligned} \{Z_{res}\} &= -([C][A]^T)^{-1} \{N_{res}\} = \\ &= \{-0,4904; 112,2\}^T \cdot 10^{-5} \text{ (м)}. \end{aligned} \quad (34)$$

Остаточная величина узлового реактивного отклика конструкции в состоянии самонапряжения (в направлении внешнего воздействия):

$$\begin{aligned} \{R_{res}\} &= -([C][A]^T[L])^{-1} \{N_{res}\} = \\ &= [5630,5; 9885,3]^T \text{ (Н)}. \end{aligned} \quad (35)$$

Остаточная величина энергии деформации составит согласно выражению (23): $U_{res} = 86,87$ (МНм).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрены два подхода к постановке и решению задач строительной механики [36]. Первый — постановка задачи на основе вариационного принципа минимума полной энергии конструктивной системы. Методика представлена задачей нахождения реактивного отклика конструкции на действие узловой силы, как задача оптимального проектирования. Второй подход базируется на вариационном принципе минимума потенциальной энергии самонапряжения конструкции (вариационном принципе критических уровней энергии). Методика определения параметров самонапряжения — задача на собственные значения. Цели постановки и решения двух задач — определение экстремальных реактивных откликов конструкции на возможные внешние воздействия. Реактивный отклик представлен параметрами конструкции, располагающимися в левой части неравенств предельного состояния несущей системы (1), и содержит их предельные величины.

Постановка задачи об условиях предельного состояния конструкции может быть решена как задача исследования экстремальных величин параметров отклика конструкции на возможные внешние воздействия на критических уровнях энергии деформации в состоянии самонапряжения. Получена единая физико-математическая модель исследования конструкции, находящейся в предельном состоянии. Она охватывает предельные состояния 1-й и 2-й группы, а задачи строительной механики получают единую расчетную математическую модель в виде задач на собственные значения.

Задача о предельных состояниях несущих систем, поставленная на основе минимума энергии деформации самонапряжения, не зависит от пути нагружения (кривой равновесных состояний), отпадает необходимость развития теории с учетом истории деформирования. Используется физико-математическая модель, описывающая состояние конструкции в момент, когда конструкция находится в предельном состоянии.

Соотношения обобщенных внутренних сил, перемещений и величин потенциальной энергии деформации на критических уровнях в состоянии самонапряжения одинаковы и пропорциональны константе. Это следствие однородности функции энергии деформации.

Нелинейная задача оптимизации заменяется квазилинейной задачей исследования потенциальной энергии деформации в состоянии самонапряжения.

Упрощаются не только постановка и решение задач оптимального проектирования, но и процедура решения. В отличие от задач оптимального проектирования, задача на собственные значения позволяет отыскать решение, соответствующее глобальному экстремуму, и учесть возможные результаты на границе области допустимых значений.

Появляется возможность оценить остаточную несущую способность конструкции посредством сравнения параметров, определяющих состояние несущей системы в любой момент нагружения. При этом нет необходимости использовать вероятностные оценки состояния конструкции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Faqih I., Prabowo A.R., Adiputra R., Muhayat N., Braun M., Ehlers S.* Application of the limit design state to hull-girder ultimate strength evaluations on the ship-shaped structures // *Procedia Structural Integrity*. 2023. Vol. 47. Pp. 812–819. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.038. EDN SQAOSC.
2. *Sun M.M., Fang H.Yu., Wang N.N., Du X.M., Zhao H.Sh., Zhai Ke.J.* Limit state equation and failure pressure prediction model of pipeline with complex loading // *Nature Communications*. 2024. Vol. 15. Issue 1. P. 4473. DOI: 10.1038/s41467-024-48688-1. EDN CIMRWD.
3. *Youssef M.N.N., Megahed M.M., Saleh Ch.A.R., Mohammed S.N.S.* Plastic behavior and shakedown limit of defected pressurized pipe under cyclic bending moment // *Journal of Engineering and Applied Science*. 2024. Vol. 71. Issue 1. P. 106. DOI: 10.1186/s44147-024-00444-4. EDN IVGHDJ.
4. *Hegyí D., Márton P., Halmos B., Armuth M.* The application of the plastic limit analysis to extend the load-bearing capacity of historical timber roofs // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. P. 105349. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105349. EDN MIISIE.
5. *Yousef-beik S.M.M., Veismoradi S., Zarnani P., Quenneville P.* Design and testing of a self-centering friction damper-brace for compression ultimate limit state: Inelastic buckling // *Structures*. 2024. Vol. 62. P. 106166. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106166. EDN VCYPDO.
6. *Setiawan R., Komara A.I., Budiwantoro B.* Numerical and experimental investigation of aluminum double arrowhead cellular structure manufactured using sheet metal forming // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. P. 104667. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104667. EDN JWXUKW.
7. *Dong Sh., Pan W., Ye L., Wang J.* Design of displacement-based viscous damper damping structures // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Issue 1. P. 11742. DOI: 10.1038/s41598-025-94016-y. EDN GXVLLZ.
8. *Zhou J., Qin Ch.* Limit state analysis of rigid retaining structures against seismically induced passive failure in heterogeneous soils // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023. DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.04.009. EDN NCXEIL.
9. *Hurtado O.D., Álvarez A., Ortiz A.R., Areiza G., Thomson P.* Evaluation of steel ratio limits for reinforced concrete beams using reliability analysis and Bayesian methods // *Structures*. 2024. Vol. 70. P. 107611. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107611. EDN WUESBZ.
10. *Rozylo P.* Limit states of thin-walled composite structures with closed sections under axial compression // *Composites Part B: Engineering*. 2024. Vol. 287. P. 111813. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111813. EDN KVFYLK.
11. *Cacho-Pérez M.* Limit analysis of 3D building structures // *Journal of Constructional Steel Research*. 2025. Vol. 234. P. 109662. DOI: 10.1016/j.jcsr.2025.109662. EDN SDSYFW.
12. *Aita D., Bruggi M., Taliercio A.* Limit analysis of masonry arches and domes with finite strength: funicular analysis versus stability area method // *Mecanica*. 2024. DOI: 10.1007/s11012-024-01781-7. EDN SMCTGP.
13. *Trentadue F., De Tommasi D., Marasciuolo N.* A new approach to the limit analysis of masonry structures as assemblies of rigid-plastic blocks with frictional sliding contacts // *Structures*. 2025. Vol. 76. P. 108895. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.108895. EDN UZLPJO.
14. *Ditommaso R., Lamarucciola N., Ponzo F.C.* Prediction of the fundamental period of infilled RC framed structures considering the maximum inter-story drift at different design limit states // *Structures*. 2024. Vol. 63. P. 106422. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106422. EDN RUSRNC.
15. *Lee Do.H., Tra S.N., Kim D.J., Lee K.* Experimental observation on the seismic performance of re-

inforced concrete columns with a well-confined plastic hinge region // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Issue 1. P. 22564. DOI: 10.1038/s41598-025-05493-0. EDN GODNCT.

16. *Aicher S., Münzer A., Simon K.* Screw-press gluing in timber construction — press force predictions and application limits // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 27. P. 106499. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106499. EDN VQXRRA.

17. *Long H., Liu Y., Huang Ch., Liu K.* Fatigue life prediction of beam structures with breathing cracks using finite element analysis // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 28. P. 107666. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107666. EDN OWQQA.

18. *Al-Hasani L.E., Park J., Brown Ja.B., Antommattei O., Cho Y.K., Gentry T.R. et al.* Performance-based limit criteria and temperature mitigation alternatives for the holistic reassessment of a mass concrete structure // *Case Studies in Construction Materials*. 2024. Vol. 20. P. e03326. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03326. EDN EWDJIM.

19. *Parthasarathi N., Prakash M., Kontoni D.P.N.* Assessing failure mechanisms in reinforced concrete frame structures under thermos-mechanical loading using finite element analysis // *Asian Journal of Civil Engineering*. 2025. Vol. 26. Issue 8. Pp. 3289–3315. DOI: 10.1007/s42107-025-01374-z. EDN DPVQVK.

20. *Ferrier E., Le Roy C., Gagnon A., Leprete E., Benzarti K., Aubagnac C.* Temperature dependence of the bond strength in externally bonded CFRP systems for concrete structures // *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 486. P. 141933. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141933. EDN UMVZU.

21. *Федотова М.И., Шмелев Г.Д., Жукова А.В.* Оценка риска обрушения здания или его части по величинам контролируемых кренов и осадок // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2023. № 1 (24). С. 9–17. DOI: 10.36622/VSTU.2023.24.1.001. EDN NWQJLC.

22. *Шмелев Г.Д., Ишков А.Н., Кононова М.С.* Учет деградации материалов при проведении поверочных расчетов строительных конструкций // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2025. № 1 (32). С. 20–29. DOI: 10.36622/2541-9110.2025.32.1.002. EDN SBRLNZ.

23. *Федосов С.В., Котлов В.Г., Поздеев А.Г., Кузнецова Ю.А., Таран А.В.* Оценка коэффициентов предельных состояний деревянных конструкций на основе теории нечетких множеств // *Вестник Поволжского государственного технологического университета*. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2022. № 2. С. 36–50. DOI: 10.25686/2542-114X.2022.2.36. EDN QQXLCU.

24. *Наконечный С.Н., Азовцев А.Г.* К вопросу определения предельных состояний по огнестойкости строительных конструкций // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2024. № 4 (53). С. 79–84. EDN HLTCJK.

25. *Голубов Е.В., Бибииков М.В.* Исследование предельных состояний строительных конструкций и способов их нормирования // *Актуальные вопросы техники, науки, технологии : сб. науч. тр. национ. конф.* 2024. С. 490–492. EDN ZMVLHO.

26. *Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Kudyakov K.L.* Determination of the criteria of deformation in a special limiting state // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. Vol. 17. Issue 1. Pp. 108–116. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116. EDN EZKHRK.

27. *Перельмутер А.В.* Использование критерия отпорности для оценки предельного состояния конструкции // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 12. С. 1559–1566. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.12.1559-1566. EDN PKYMMG.

28. *Abdelmaksoud A.M., Oudah F.* A limit state approach for considering greenhouse gas emissions in the structural design of buildings: Environmental Impact Limit State (EILS) // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 97. P. 110866. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.110866. EDN IQIXEH.

29. *Надольский В.В.* Нормируемые значения вероятности отказа строительных конструкций // *Строительство и реконструкция*. 2024. № 5 (115). С. 70–81. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-115-5-70-81. EDN CDGMOD.

30. *Соловьев С.А., Соловьева А.А., Умнякова Н.П., Кочкин А.А.* Анализ проблем оценки индекса надежности элементов строительных конструкций // *Жилищное строительство*. 2022. № 7. С. 32–39. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-7-32-39. EDN HYDHNH.

31. *Соловьев С.А., Конейкин О.Е., Соловьева А.А.* Вероятностный метод проектирования стальных ферм на заданный уровень надежности и долговечности // *Вестник МГСУ*. 2025. Т. 20. № 5. С. 655–666. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.655-666. EDN YHRGTU.

32. *Герасимов Е.П.* Нормирование надежности строительных конструкций по деформациям исходя из эстетико-психологических требований // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. Т. 24. № 2. С. 87–94. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-87-94. EDN TGSQKB.

33. *Сафаров А.Р., Дорожнинский В.Б., Андреев В.И.* Оценка живучести железобетонной рамы в нелинейной динамической постановке методом статистических испытаний // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2024. № 12 (792). С. 43–55. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-792-12-43-55. EDN СПАНМ.

34. *Шмелев Г.Д., Сазонов Э.В.* Теоретические предпосылки оценки технического риска для строительных конструкций эксплуатируемых объектов // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфра-*

структура. 2023. № 3 (26). С. 9–16. DOI: 10.36622/VSTU.2023.26.3.001. EDN SYRQZH.

35. Смоляго Г.А., Демин В.О., Фролов Н.В., Дрокин С.В. Оценка остаточного срока службы железобетонных перекрытий с коррозионными повреждениями // *Строительство и архитектура*. 2023. Т. 11. № 3. С. 17. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-3-17-17. EDN FVRYOY.

36. Ступишин Л.Ю., Никитин К.Е. Принципы минимума полной энергии деформации и критических уровней энергии как основа методик решения задач строительной механики // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2025. № 3 (320). С. 32–41. DOI: 10.37538/0039-2383.2025.3.32.41. EDN PUASVE.

37. Way A., Bakker F., Proske D., Viljoen C. Serviceability limit state target reliability for concrete struc-

tures // *Structural Safety*. 2025. Vol. 114. P. 102572. DOI: 10.1016/j.strusafe.2024.102572. EDN MHHEUP.

38. Ступишин Л.Ю., Мошкевич М.Л. Решение задач об изгибе балки на основе вариационного критерия критических уровней энергии // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 3. С. 306–316. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.306-316. EDN NCBVQD.

39. Stupishin L., Moshkevich M.L., Rynkovskaya M. Critical Strain Energy Levels Criterion for Structures with Lumped Parameters // *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2025. Vol. 11. Issue 1. Pp. 253–263. DOI: 10.22055/jacm.2024.46807.4598

40. Stupishin L., Moshkevich M. Limit states design theory based on critical energy levels criterion in force method form // *Magazine of Civil Engineering*. 2022. No. 3 (111). DOI: 10.34910/MCE.111.1. EDN EBEHQM.

Поступила в редакцию 10 января 2026 г.

Принята в доработанном виде 12 января 2026 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Леонид Юлианович Ступишин — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительной и теоретической механики; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 56035058900, ResearcherID: F-8492-2015, ORCID: 0000-0002-1794-867X; StupishinLyu@mgsu.ru;

Мария Леонидовна Мошкевич — кандидат экономических наук, доцент, руководитель учебной части; Филиал «Академия ТОП Курск» Автономной некоммерческой организации дополнительного профессионального образования «Академия ТОП»; 305004, г. Курск, ул. Ленина, д. 60; SPIN-код: 3330-0309, РИНЦ ID: 616600, Scopus: 56189158100, ResearcherID: F-6741-2016, ORCID: 0000-0001-8749-2252; mmoshkevich@mail.ru.

Вклад авторов:

Ступишин Л.Ю. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Мошкевич М.Л. — участие в разработке примеров и их реализации, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Faqih I., Prabowo A.R., Adiputra R., Muhayat N., Braun M., Ehlers S. Application of the limit design state to hull-girder ultimate strength evaluations on the ship-shaped structures. *Procedia Structural Integrity*. 2023; 47:812-819. DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.038. EDN SQAOSC.

2. Sun M.M., Fang H.Yu., Wang N.N., Du X.M., Zhao H.Sh., Zhai Ke.J. Limit state equation and failure pressure prediction model of pipeline with complex loading. *Nature Communications*. 2024; 15(1):4473. DOI: 10.1038/s41467-024-48688-1. EDN CIMRWD.

3. Youssef M.N.N., Megahed M.M., Saleh Ch.A.R., Mohammed S.N.S. Plastic behavior and shakedown limit of defected pressurized pipe under cyclic bending moment. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2024; 71(1):106. DOI: 10.1186/s44147-024-00444-4. EDN IVGHDJ.

4. Hegyi D., Márton P., Halmos B., Armuth M. The application of the plastic limit analysis to extend

the load-bearing capacity of historical timber roofs. *Results in Engineering*. 2025; 26:105349. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105349. EDN MIISIE.

5. Yousef-beik S.M.M., Veismoradi S., Zarnani P., Quenneville P. Design and testing of a self-centering friction damper-brace for compression ultimate limit state: Inelastic buckling. *Structures*. 2024; 62:106166. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106166. EDN VCYPDO.

6. Setiawan R., Komara A.I., Budiwantoro B. Numerical and experimental investigation of aluminum double arrowhead cellular structure manufactured using sheet metal forming. *Results in Engineering*. 2025; 26:104667. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.104667. EDN JWXUKW.

7. Dong Sh., Pan W., Ye L., Wang J. Design of displacement-based viscous damper damping structures. *Scientific Reports*. 2025; 15(1):11742. DOI: 10.1038/s41598-025-94016-y. EDN GXVLLZ.

8. Zhou J., Qin Ch. Limit state analysis of rigid retaining structures against seismically induced passive failure in heterogeneous soils. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023. DOI: 10.1016/j.jrmge.2023.04.009. EDN NCXEIL.
9. Hurtado O.D., Álvarez A., Ortiz A.R., Areiza G., Thomson P. Evaluation of steel ratio limits for reinforced concrete beams using reliability analysis and Bayesian methods. *Structures*. 2024; 70:107611. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107611. EDN WUESBZ.
10. Rozylo P. Limit states of thin-walled composite structures with closed sections under axial compression. *Composites Part B: Engineering*. 2024; 287:111813. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111813. EDN KVFYLY.
11. Cacho-Pérez M. Limit analysis of 3D building structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2025; 234:109662. DOI: 10.1016/j.jcsr.2025.109662. EDN SDSYFW.
12. Aita D., Bruggi M., Taliercio A. Limit analysis of masonry arches and domes with finite strength: funicular analysis versus stability area method. *Meccanica*. 2024. DOI: 10.1007/s11012-024-01781-7. EDN SMCTGP.
13. Trentadue F., De Tommasi D., Marasciuolo N. A new approach to the limit analysis of masonry structures as assemblies of rigid-plastic blocks with frictional sliding contacts. *Structures*. 2025; 76:108895. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.108895. EDN UZLPJO.
14. Ditommaso R., Lamarucciola N., Ponzio F.C. Prediction of the fundamental period of infilled RC framed structures considering the maximum inter-story drift at different design limit states. *Structures*. 2024; 63:106422. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106422. EDN RUSRNC.
15. Lee Do.H., Tra S.N., Kim D.J., Lee K. Experimental observation on the seismic performance of reinforced concrete columns with a well-confined plastic hinge region. *Scientific Reports*. 2025; 15(1):22564. DOI: 10.1038/s41598-025-05493-0. EDN GODNCT.
16. Aicher S., Münzer A., Simon K. Screw-press gluing in timber construction — press force predictions and application limits. *Results in Engineering*. 2025; 27:106499. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106499. EDN VQXRRA.
17. Long H., Liu Y., Huang Ch., Liu K. Fatigue life prediction of beam structures with breathing cracks using finite element analysis. *Results in Engineering*. 2025; 28:107666. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107666. EDN OWQQA.
18. Al-Hasani L.E., Park J., Brown Ja.B., Antommattei O., Cho Y.K., Gentry T.R. et al. Performance-based limit criteria and temperature mitigation alternatives for the holistic reassessment of a mass concrete structure. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 20:e03326. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03326. EDN EWDJIM.
19. Parthasarathi N., Prakash M., Kontoni D.P.N. Assessing failure mechanisms in reinforced concrete frame structures under thermos-mechanical loading using finite element analysis. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2025; 26(8):3289-3315. DOI: 10.1007/s42107-025-01374-z. EDN DPVQVK.
20. Ferrier E., Le Roy C., Gagnon A., Leprete E., Benzarti K., Aubagnac C. Temperature dependence of the bond strength in externally bonded CFRP systems for concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2025; 486:141933. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141933. EDN UMVZZU.
21. Fedotova M.I., Shmelev G.D., Zhukova A.V. Assessment of the risk of collapse of a building or its part according to the values of controlled lurch and subsidence. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2023; 1(24):9-17. DOI: 10.36622/VSTU.2023.24.1.001. EDN NWQJLC. (rus.).
22. Shmelev G.D., Ishkov A.N., Kononova M.S. Consideration of materials degradation during verification calculations of building structures. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2025; 1(32):20-29. DOI: 10.36622/2541-9110.2025.32.1.002. EDN SBRLNZ. (rus.).
23. Fedosov S.V., Kotlov V.G., Pozdeev A.G., Kuznetsova Iu.A., Taran A.V. Coefficient estimation of limit states in wooden structures based on the theory of fuzzy sets. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2022; 2:36-50. DOI: 10.25686/2542-114X.2022.2.36. EDN QXQLCU. (rus.).
24. Nakonechnyy S.N., Azovtsev A.G. On the issue of determining limit states for fire resistance of building structures. *Modern Problems of Civil Protection*. 2024; 4(53):79-84. EDN HLTCJK. (rus.).
25. Golubov E.V., Bibikov M.V. Investigation of the limiting conditions of building structures and ways of their normalization. *Current Issues of Engineering, Science, Technology: collection of scientific papers of the national conference*. 2024; 490-492. EDN ZMVLHO. (rus.).
26. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Kudyakov K.L. Determination of the criteria of deformation in a special limiting state. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(1):108-116. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-1-108-116. EDN EZKHRK.
27. Perelmuter A.V. Using the criterion of resistibility to assess of a structural limit state. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(12):1559-1566. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.12.1559-1566. EDN PKYMMG. (rus.).
28. Abdelmaksoud A.M., Oudah F. A limit state approach for considering greenhouse gas emissions in the structural design of buildings: Environmental Impact Limit State (EILS). *Journal of Building Engineering*. 2024; 97:110866. DOI: 10.1016/j.jobee.2024.110866. EDN IQIXEH.

29. Nadolski V.V. Standardized values of the failure probability of building structures. *Building and Reconstruction*. 2024; 5(115):70-81. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-115-5-70-81. EDN CDGMOD. (rus.).
30. Soloviev S.A., Solovieva A.A., Umniakova N.P., Kochkin A.A. Analysis of the problems of assessing the reliability index of elements of building structures. *Housing Construction*. 2022; 7:32-39. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-7-32-39. EDN HYDHNH. (rus.).
31. Solovyev S.A., Kopeykin O.E., Solovyeva A.A. Probabilistic method of designing steel trusses for a given level of reliability and durability. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(5):655-666. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.655-666. EDN YHRGTU. (rus.).
32. Gerasimov E.P. Building reliability specification by deformation based on aesthetic and psychological requirements. *Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24(2):87-94. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-87-94. EDN TGSQKB. (rus.).
33. Safarov A.R., Dorozhinskiy V.B., Andreev V.I. Assessment of robustness of reinforced concrete frame in a nonlinear dynamic statement by statistical test method. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024; 12(792):43-55. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-792-12-43-55. EDN CIIAHM. (rus.).
34. Shmelev G.D., Sazonov E.V. Theoretical prerequisites for the assessment of technical risk for building structures of operated facilities. *Housing and Utilities Infrastructure*. 2023; 3(26):9-16. DOI: 10.36622/VSTU.2023.26.3.001. EDN SYRQZH. (rus.).
35. Smolyago G., Demin V., Frolov N., Drokin S. Assessment of the residual service life of reinforced concrete slabs with corrosion damage. *Construction and Architecture*. 2023; 11(3):17. DOI: 10.29039/2308-0191-2023-11-3-17-17. EDN FVRYOY. (rus.).
36. Stupishin L.Y., Nikitin K.E. The principle of minimum total strain energy and critical energy levels as the basis of the methodology for solving problems of structural mechanics. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2025; 3(320):32-41. DOI: 10.37538/0039-2383.2025.3.32.41. EDN PUASVE. (rus.).
37. Way A., Bakker F., Proske D., Viljoen C. Serviceability limit state target reliability for concrete structures. *Structural Safety*. 2025; 114:102572. DOI: 10.1016/j.strusafe.2024.102572. EDN MHHEUP.
38. Stupishin L.Yu., Moshkevich M.L. Problems of beam bending solution on the basis of variation criterion of critical energy levels. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):306-316. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.306-316. EDN NCBVQD. (rus.).
39. Stupishin L., Moshkevich M.L., Rynkovskaya M. Critical Strain Energy Levels Criterion for Structures with Lumped Parameters. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2025; 11(1):253-263. DOI: 10.22055/jacm.2024.46807.4598
40. Stupishin L., Moshkevich M. Limit states design theory based on critical energy levels criterion in force method form. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 3(111). DOI: 10.34910/MCE.111.1. EDN EBEHQM.

Received January 10, 2026.

Adopted in revised form on January 12, 2026.

Approved for publication on January 29, 2026.

B I O N O T E S : **Leonid Yu. Stupishin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 56035058900, ResearcherID: F-8492-2015, ORCID: 0000-0002-1794-867X; StupishinLyu@mgsu.ru;

Mariia L. Moshkevich — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Academic Department; **Branch “TOP Academy Kursk” of the Autonomous Non-Commercial Organization of Continuing Professional Education “TOP Academy”**; 60 Lenin st., Kursk, 305040, Russian Federation; SPIN-code: 3330-0309, ID RSCI: 616600, Scopus: 56189158100, ResearcherID: F-6741-2016, ORCID: 0000-0001-8749-2252; mmoshke-vich@mail.ru.

Contribution of the authors:

Leonid Yu. Stupishin — supervision, conceptualization, methodology, writing the original text, final conclusions.

Mariia L. Moshkevich — data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.075.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.701-713

Устойчивость жестко заделанной консоли двутаврового сечения с двумя осями симметрии с переменной высотой стенки

Александр Олегович Ильюшенков

Территориальный проектный институт «Хабаровскпромпроект» (ТПИ «Хабаровскпромпроект»);
г. Хабаровск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследуется устойчивость жестко заделанной консоли двутаврового сечения с двумя осями симметрии с переменной высотой стенки под действием сосредоточенной силы и равномерно распределенной нагрузки. Упругие решения изгибно-крутильной устойчивости приведены в замкнутой форме и получены с помощью энергетического метода с применением измененной базисной функции для угла закручивания балки. Целью статьи является уточнение и исправление бифуркационных решений консольных балок и представление их в альтернативных формулировках. Результаты приведены в новых выражениях, включающих изгибно-крутильный параметр балки ψ_0 и параметр влияния места приложения поперечной нагрузки по высоте η . Теоретическая работа проделана в соответствии с СП 16.13330.2017. Унифицированные формулы изгибно-крутильной устойчивости консольных балок могут быть использованы для решения не только элементов с линейно изменяющейся высотой балки, но и случаев постоянной жесткости. Простота достигается за счет минимизации числа членов в пробных функциях и введением альтернативной, но близкой к реальному поведению балки функции угла закручивания при действии поперечной нагрузки.

Материалы и методы. В теоретической работе использовано уточненное решение изгибно-крутильной устойчивости и энергетический метод расчета устойчивости.

Результаты. На основе сделанных уточнений получено замкнутое решение задачи упругой изгибно-крутильной потери устойчивости балки с линейно изменяющейся высотой стенки. По результатам проделанной работы предложены формулы для вычисления упругой критической нагрузки с целью проверки выполнения условия плоской формы устойчивости тонкостенного элемента открытого сечения.

Выводы. Выполненное исследование демонстрирует обновленное решение задачи изгибно-крутильной потери устойчивости консольной балки с линейно изменяющейся высотой стенки открытого сечения с участием альтернативной пробной функции закручивания. Конечное решение приведено в замкнутой форме, но с дополнительными поправками в виде формульных коэффициентов и остается справедливым, в том числе и для решения балок постоянной жесткости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: изгибно-крутильная потеря устойчивости, упругая потеря устойчивости, балка переменного сечения, стальные балки, редукция, параметр высоты приложения нагрузки, изгибно-крутильный параметр, пробная функция, энергетический метод

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ильюшенков А.О. Устойчивость жестко заделанной консоли двутаврового сечения с двумя осями симметрии с переменной высотой стенки // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 701–713. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.701-713

Автор, ответственный за переписку: Александр Олегович Ильюшенков, revivaltree@gmail.com.

Stability of a Doubly Symmetric Web-Tapered I-Beam Cantilever

Alexander O. Ilyushenkov

Territorial Design Institute “Khabarovskpromproekt”; Khabarovsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The current paper examines the stability of cantilevered symmetrical web-tapered I-beams under end point load and uniformly distributed load. Elastic lateral-torsional buckling solutions are given in closed form and based on an energy approach with alternative trial functions for twist rotation. The aim of the paper is to refine and rectify bifurcation solutions of the cantilevered beams and present them in alternative formulations. Results are given in new terms that include lateral-torsional beam parameter ψ_0 and load height parameter η . Theoretical work has been done with respect to the current state and philosophy of steel design code CP 16.13330.2017. Unified simple formulae for the lateral-torsional buckling capacities of cantilevered beams can be addressed for solving not only non-prismatic cases but prismatic cases too. Simplicity achieved by minimizing the number of terms in trial functions and subsidized with different and closed ones to real behavior of the beam under transverse loads.

Materials and methods. Refined lateral-torsional buckling solution and an energy method were used in the work.

Results. Based on given refinements, a closed form of elastic lateral-torsional buckling solution of a linear non-prismatic member was obtained. As a result of the theoretical work evaluated, a lateral-torsional buckling formula was introduced.

Conclusions. The current theoretical work shows that the solution of lateral-torsional buckling problem of web-tapered cantilevered I-beam with thin-walled open cross sections can be rectified by introducing alternative trial function for twist rotation and given in closed form with additional coefficients. The solution stays relevant for prismatic cases.

KEYWORDS: lateral-torsional buckling, elastic buckling, web-tapered beam, steel beams, reduction, height parameter, lateral-torsional parameter, trial function, energy method

FOR CITATION: Ilyushenkov A.O. Stability of a Doubly Symmetric Web-Tapered I-Beam Cantilever. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):701-713. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.701-713 (rus.).

Corresponding author: Alexander O. Ilyushenkov, revivaltree@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Бифуркационное и деформационное решения задачи об изгибно-крутильной потере устойчивости консольного стержня, в том числе и переменной жесткости, хорошо известны. В контексте настоящего теоретического исследования развивается только бифуркационное решение, так как, согласно нормативному подходу¹, расчет на устойчивость двутавровых стальных балок исходит из рассмотрения именно бифуркационной задачи в рамках технической теории открытого тонкостенного стержня В.З. Власова [1], которая подробно изложена в книге Б.М. Броуде [2]. Большой вклад в развитие методов расчета балок, включая и жестко заделанные консоли, внес N.S. Trahair [3–7]. Другим хорошо известным исследованием, в котором предложено замкнутое решение для консольных балок, является работа С.М. Wang и S. Kitipornchai [8]. Из наиболее полных современных трудов следует назвать А. Andrade [9, 10] и В. Dowswell [11]. В. Dowswell, как и другие исследователи, для получения замкнутого решения использует численные методы. С.М. Wang и S. Kitipornchai изучают задачу методом конечных разностей и энергетическим методом и на основании построенных графиков приводят конечные формулы с числовыми коэффициентами, которые зависят от вида и места приложения поперечной нагрузки. N.S. Trahair и В. Dowswell приводят решения, опираясь на результаты расчетов, полученные с помощью специально созданного программного обеспечения. В. Dowswell получает согласующиеся с N.S. Trahair результаты и по кривым устойчивости в зависимости от изгибно-крутильной характеристики балки α строит аппроксимационные зависимости, которые нормативно закреплены в национальных стандартах США ANSI/AISC 360–22². Аналогичным образом поступает и D.A. Nethercot [12–14], анализирующий устойчивость балки с помощью метода конечных элементов и предлагающий использовать набор поправочных коэффициентов в зависимости от α . Как можно заметить, исследования сводятся к единственной процедуре, состоящей из численно-

го анализа и последующей аппроксимации кривых устойчивости с целью получения конечного решения в зависимости от изгибно-крутильной характеристики α .

Данное исследование предлагает не только отказаться от такого подхода, но и ввести альтернативную базисную функцию, которая позволит избежать ресурсоемких вычислений и свести систему алгебраических уравнений критической нагрузки к одному уравнению.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При рассмотрении задачи изгибно-крутильной потери устойчивости балочного элемента применены гипотеза жесткого сечения В.З. Власова, согласно которой поперечное сечение настолько жесткое, что его первоначальная форма сохраняется при выпучивании, а также гипотеза плоских сечений Эйлера – Бернулли. Классическая модель балки Эйлера – Бернулли отличается от балки Тимошенко отсутствием сдвиговой деформации первого порядка [15] и остается справедливой при изучении длинных тонкостенных балок $l/h > 4$ при малых деформациях. Для очень коротких $l/h < 1$ и толстых балок сдвиговая деформация по высоте сечения развивается по криволинейной зависимости и рассматривается с помощью модели Редди [16].

В энергетическом методе расчета упругого бокового выпучивания балки исследуется работа внешних и внутренних сил [17, 18].

Работа внутренних сил:

$$A = \frac{1}{2} \int_0^l (EI_y u''^2 + GI_t \theta'^2 + EI_\omega \theta''^2) dz, \quad (1)$$

где E — модуль упругости; I_y — момент инерции из плоскости наибольшей жесткости; I_t — момент инерции при кручении; I_ω — секториальный момент инерции.

Работа внешних сил:

$$\Theta = \int_0^l M_x \theta u'' dz + \frac{1}{2} \int_0^l q_y e_y \theta^2 dz + \frac{1}{2} \sum Q e_y \theta^2, \quad (2)$$

где M_x — закон изменения изгибающего момента от действия поперечной нагрузки; $M_x = -M$, $M_x = Q(z-l)$, $M_x = -0,5q_y(z-l)^2$ — частные законы изменения изгибающего момента; q — равномерно распределенная нагрузка; e_y — ордината у места приложения по-

¹ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М.: Минстрой России; 2017.

² ANSI/AISC 360–22. Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, 2022. URL: <https://www.aisc.org/globalassets/product-files-not-searched/publications/standards/a360-22w.pdf>

перечной нагрузки по высоте поперечного сечения балки; Q — поперечная сила.

При нагружении балочного элемента внешней поперечной нагрузкой происходит превращение потенциальной энергии. По мере того, как нагрузка растет и приближается к некоторому критическому значению, потенциальная энергия деформации увеличивается и достигает максимума в момент, когда балка из своего прямолинейного состояния переходит в слегка изогнутое.

Полная потенциальная энергия системы определяется равенством:

$$\Pi = \Xi + A. \quad (3)$$

Для решения интегрального равенства следует задаваться базисными функциями перемещения поперек u и закручивания θ стержня в момент потери устойчивости:

$$\begin{cases} u = \sum_{i=1}^n A_i \delta_i \\ \theta = \sum_{i=1}^n B_i \varphi_i \end{cases}, \quad (4)$$

где A_i и B_i — постоянные неизвестные коэффициенты; δ_i и φ_i — некоторые функции, соответствующие кинематическим и статическим граничным условиям.

Согласно минимуму энергии должно выполняться условие:

$$\begin{cases} \frac{d\Pi}{dA_i} = 0 \\ \frac{d\Pi}{dB_i} = 0 \end{cases}. \quad (5)$$

На рис. 1 приведена расчетная схема рассматриваемой жестко заделанной консоли двутаврового сечения с линейно изменяющейся высотой стенки. Начало отсчета (ноль) при интегрировании принимается в заделке. Так как рассматривается балка с линейно изменяющейся высотой стенки, то при $z = 0$ наибольшая высота балки h_1 и ее геометрические характеристики $I_{\omega,1}$ и $I_{t,1}$ обозначаются с нижним индексом 1. На конце при $z = l$ минимальная высота балки h_0 , и $I_{\omega,0}$ и $I_{t,0}$. Ширина пояса b_f и момент инер-

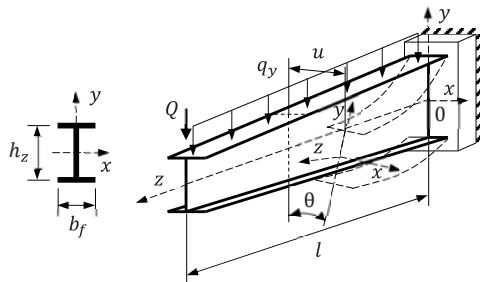


Рис. 1. Жестко заделанная двутавровая консоль с линейно изменяющейся высотой стенки

Fig. 1. Rigidly fixed I-beam cantilever with linearly tapered web

ции из плоскости наибольшей жесткости I_y остаются постоянными геометрическими характеристиками, поэтому:

$$I_y(z) = \text{const}. \quad (6)$$

Граничные условия для жестко заделанной консоли на опоре: $u(0) = u'(0) = 0$, $\theta(0) = \theta'(0) = 0$.

Для двутавровой балки переменной жесткости зададимся законом изменения жесткости по длине. Момент инерции при свободном (или чистом) кручении I_t :

$$I_{t,z} = I_{t,1} \cdot f_t = I_{t,1} \left(1 - (1 - t_t) \frac{z}{l} \right), \quad (7)$$

где $t_t = I_{t,0}/I_{t,1}$ при $z = 0$, $I_{t,z} = I_{t,1}$.

Секториальный момент инерции описывается квадратичным законом:

$$I_{\omega,z} = I_{\omega,1} \cdot f_{\omega} = I_{\omega,1} \left(1 - (1 - t_h) \frac{z}{l} \right)^2, \quad (8)$$

где $t_h = h_0/h_1$, так как для симметричного двутавра справедливо свойство $I_{\omega,z} = I_y h_z^2/4$ при $z = 0$, $I_{\omega,z} = I_{\omega,1}$.

С учетом переменности геометрических характеристик балки (7) и (8) уравнение полной потенциальной энергии (3):

$$\int_0^l (EI_y u''^2 + GI_{t,z} \theta'^2 + EI_{\omega,z} \theta''^2) dz + \int_0^l 2M_x \theta u'' dz + \int_0^l q_y e_{y,z} \theta^2 dz + \sum Q e_{y,z} \theta^2 = 0. \quad (9)$$

Выбор базисной функции. Точность решения уравнения (9) зависит от выбора базисной функции (4). Выбираемая базисная функция должна удовлетворять кинематическим и статическим граничным условиям [7]. В численных расчетах сходимость всегда гарантирована. Так как используется достаточно большое количество членов функции формы потери устойчивости, с тем чтобы получить результаты с желаемой точностью [10]. Для консольной балки обычно предлагается следующая тригонометрическая функция справедливая и для поперечного перемещения u и для закручивания θ [8, 19, 20]:

$$u = \sum_{i=1}^n A_i \left[1 - \cos \left(\frac{(2i-1)\pi z}{2l} \right) \right]. \quad (10)$$

Но лишь для случая, когда к балке прикладывается концевой момент (рис. 2, б). Если консольная балка произвольного поперечного сечения подвержена действию сосредоточенной силы или равномерно распределенной нагрузки, функция угла закручивания θ по выражению (10) оказывается менее репрезентативной, чем функция, занимающая промежуточное место между случаем полного отсутствия стесненности и частичной стесненностью в деформации (рис. 2, а):

$$\sin^2 \left(\frac{\pi z}{2l} \right) = \frac{1 - \cos \left(\frac{\pi z}{l} \right)}{2} < \theta < \sin \left(\frac{\pi z}{2l} \right). \quad (11)$$

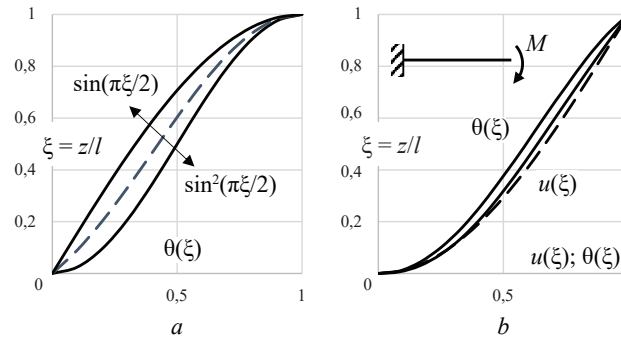


Рис. 2. Нормализованные функции устойчивости консольной двутавровой балки: *a* — рассматриваемая функция угла закручивания балки; *b* — при действии концевого момента

Fig. 2. Normalized stability functions of the cantilever I-beam: *a* — adopted beam twist angle function; *b* — under an end moment

Данное обстоятельство практически никогда не упоминается. Хотя и доказано, что функция угла закручивания по результатам численных расчетов действительно лучше всего описывается не уравнением (10), а выражением (11) [20]. Это заставляет задуматься над тем, почему в аналитических методах порой трудно получить замкнутое решение с удовлетворительной точностью, как и достаточно просто и наглядно продемонстрировать взаимное увязывание одних параметров с другими. Возможно есть смысл изменить подход в выборе базисной функции и пересмотреть решение изгибно-крутильной устойчивости консольной балки.

Средняя функция угла закручивания балки θ . Рассмотрим среднюю функцию (11):

$$\theta(\xi) = B_1 \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \cos\left(\frac{\pi z}{l}\right)}{2} + \sin\left(\frac{\pi z}{2l}\right) \right]. \quad (12)$$

Функция угла закручивания не нарушает кинематических и статических граничных условий. На примере консольной балки 30Б1 по ГОСТ 35087–2024 длиной $l = 6$ м на рис. 2, *b*, 3 показаны нормализованные формы потери устойчивости перемещения u

и закручивания θ вокруг оси z от трех видов поперечных нагрузок, приложенных по центру тяжести/изгиба поперечного сечения.

На рис. 3 сплошной линией показаны кривые, полученные по результатам расчета балки на устойчивость в ПК ЛИРА-САПР; пунктирной линией — пробные функции $\theta(\xi)$ (12) и $u(\xi)$ (10). Можно заключить, что предлагаемая средняя функция угла закручивания значительно лучше отождествляется с формой потери устойчивости нежели функция (10).

Для проверки качества сделанного предположения следует выполнить пробный расчет балки постоянной жесткости энергетическим способом с применением пробной функции $\theta(\xi)$ и сравнить полученные аналитическим способом кривые зависимости в безразмерных величинах критической нагрузки от упругой изгибно-крутильной α характеристики балки со значениями, полученными методом конечных элементов и методом конечных разностей. В расчет берется только первый член ряда (4) $i = 1$ с постоянными неизвестными коэффициентами A_1 и B_1 с целью получения замкнутого решения без необходимости решать систему линейных алгебраических уравнений или матрицы больше, чем $[2 \times 2]$. Численные решения с применением базисной функции

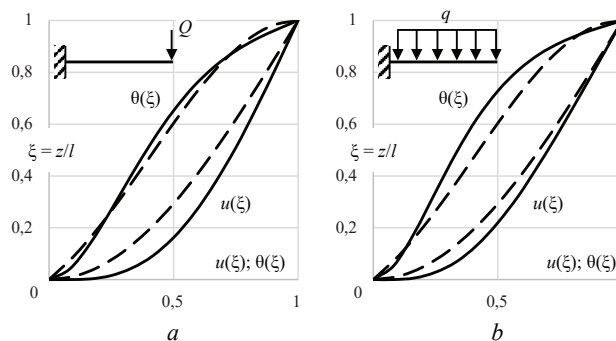


Рис. 3. Нормализованные функции потери устойчивости $u(\xi)$ и $\theta(\xi)$ при действии поперечной силы и равномерно распределенной нагрузки

Fig. 3. Normalized buckling functions $u(\xi)$ and $\theta(\xi)$ under transverse and a uniformly distributed load

косинуса (10) хорошо известны. Статья С.М. Wang и S. Kitipornchai [8] показывает, что для достижения достаточной точности в энергетическом методе расчета моносимметричной балки (симметричный двутавр рассматривается как частный случай) требуется удерживать не менее $n = 7$ членов в базисной функции $\theta(\xi)$ по функции (10). Для случая с поперечной силой Q сравнение производится с табличными данными, полученными методом конечных разностей С.П. Тимошенко [21]. Для случая равномерно распределенной нагрузки q кривая, показанная синим цветом на рис. 4, *b*, сравнивается с табличными значениями из работы S. Poley [22]. Нагрузки прикладываются по центру изгиба поперечного сечения балки с целью избежать необходимости учитывать эксцентричность приложения поперечной нагрузки. На рис. 4, *a* пунктирными линиями нанесены кривые, получаемые из рассмотрения верхней и нижней границ функции $\theta(\xi)$ по выражению (11). Сплошной линией синим цветом показана средняя кривая пробной функции по выражению (12). Как видно, такое решение демонстрирует близкие результаты к методу конечных разностей, что подтверждает выдвинутое

предложение по пересмотру базисной функции кручения. Пунктирная кривая, выделенная серым цветом (рис. 4, *a*), получена в результате аппроксимации при удержании большого количества членов тригонометрического ряда:

$$\frac{Ql^2}{\sqrt{EI_y GI_t}} = \frac{\pi^2}{2} \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\alpha}}. \quad (13)$$

Для равномерно распределенной нагрузки q кривая (пунктир серого цвета на рис. 4, *b*) вновь оказывается близкой к точной и показывает заниженные значения. Пунктиром показана с достаточной точностью аппроксимация:

$$\frac{ql^3}{\sqrt{EI_y GI_t}} = 2\pi^2 \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\alpha}}. \quad (14)$$

В табл. 1 сведены уравнения кривых $\gamma(\alpha)$ и $m(\alpha)$. Они имеют идентичные формулировки и различаются лишь числовыми коэффициентами при π .

На основании предварительных расчетов можно обосновать возможность применения средней функции угла закручивания консольной балки в качестве формы потери устойчивости и перейти к раз-

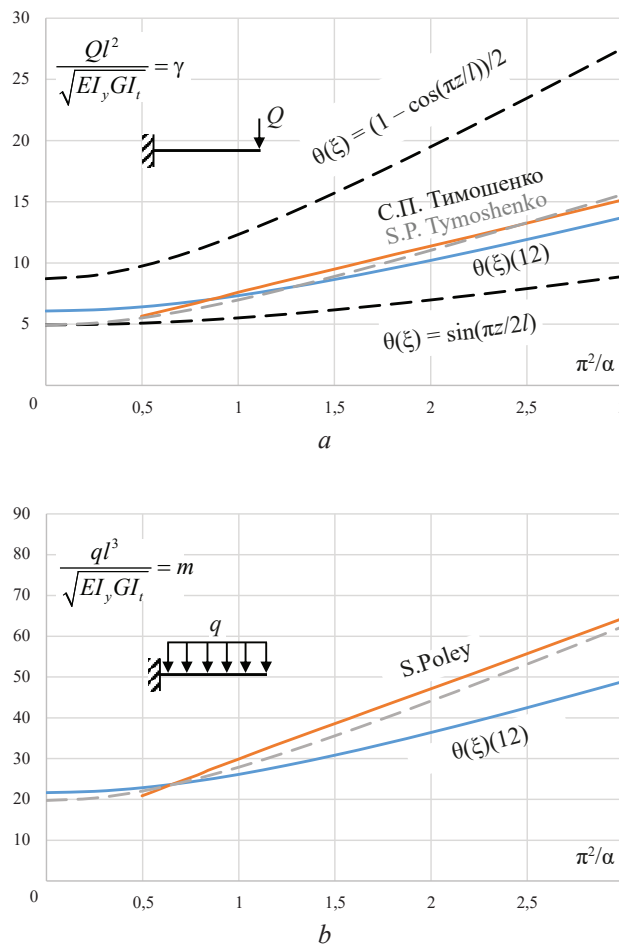


Рис. 4. Изгибно-крутильные кривые устойчивости при действии: *a* — поперечной силы; *b* — равномерно распределенной нагрузки

Fig. 4. Lateral-torsional buckling curves under: *a* — a transverse load; *b* — a uniformly distributed load

Табл. 1. Изгибно-крутильные кривые γ и m

Table 1. Lateral-torsional buckling γ and m results

Функция θ Function θ	$\frac{Ql^2}{\sqrt{EI_y GI_t}} = \gamma$	$\frac{ql^3}{\sqrt{EI_y GI_t}} = m$
$\frac{1 - \cos(\pi z/l)}{2}$	$\frac{\pi^2}{9} \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\alpha}}$	–
$\sin(\pi z/2l)$	$\frac{\pi^2}{2} \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{4\alpha}}$	–
$\frac{1}{2} \left(\frac{1 - \cos(\pi z/l)}{2} + \sin(\pi z/2l) \right)$	$4 \sqrt{\frac{\pi^2}{4} + \frac{\pi^2}{\alpha}}$	$\frac{3\pi^2}{2} \sqrt{\frac{\pi^2}{4} + \frac{\pi^2}{\alpha}}$
С.П. Тимошенко [21] S.P. Timoshenko [21]	$3,8 \left(1 + \frac{\pi^2}{\alpha} \right)$	–
S. Poley [22]	–	$12,4 \left(1 + 1,4 \frac{\pi^2}{\alpha} \right)$
Аппроксимация Approximation	$\frac{\pi^2}{2} \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\alpha}}$	$2\pi^2 \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{\alpha}}$

решению вопроса изгибно-крутильной устойчивости консольной балки переменной жесткости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Двухавровая консольная балка переменной высоты под действием поперечной силы

Получим решения в замкнутом виде для двух нормативных случаев приложения поперечной нагрузки согласно своду правил по стальным конструкциям. На рис. 5 приведена расчетная схема жестко заделанной консоли при действии поперечной силы Q , приложенной на расстоянии e_y от центра тяжести/изгиба балки.

В энергетическом методе расчета вначале требуется найти производные функций перемещения u и угла закручивания θ . Для перемещения u выбираем функцию косинуса. Удерживаем только первое слагаемое в тригонометрическом ряду:

$$u = A_1 \left[1 - \cos\left(\frac{\pi z}{2l}\right) \right] = A_1 \delta. \tag{15}$$

Первая и вторая производные перемещения балки поперек:

$$u' = A_1 \frac{\pi}{2l} \sin\left(\frac{\pi z}{2l}\right) = A_1 \delta'; \tag{16}$$

$$u'' = A_1 \frac{\pi^2}{4l^2} \cos\left(\frac{\pi z}{2l}\right) = A_1 \delta''. \tag{17}$$

Первая и вторая производные угла закручивания балки:

$$\theta' = B_1 \frac{\pi}{4l} \left[\sin\left(\frac{\pi z}{l}\right) + \cos\left(\frac{\pi z}{2l}\right) \right] = B_1 \phi'; \tag{18}$$

$$\theta'' = B_1 \frac{\pi^2}{4l^2} \left[\cos\left(\frac{\pi z}{l}\right) - \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi z}{2l}\right) \right] = B_1 \phi''. \tag{19}$$

Находим интегралы части равенства работы внутренних сил, которые не зависят от вида поперечной нагрузки и остаются стационарными величинами. С появлением переменности при геометрических характеристиках $I_{t,1}$ и $I_{\omega,1}$ возникают редуционные коэффици-

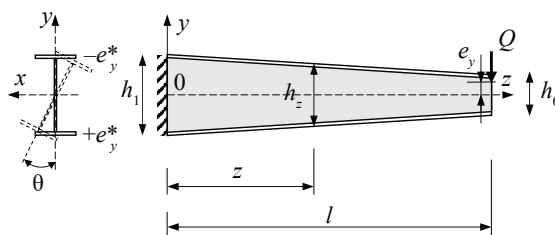


Рис. 5. Балка переменной жесткости под действием поперечной силы

Fig. 5. Variable-stiffness I-beam under transverse load

енты. Таким образом создается эквивалентная аналогия путем редуцирования геометрических характеристик, которая приводит задачу устойчивости балки переменной жесткости к балке постоянной жесткости:

$$B_1^2 GI_{t,1} \int_0^l \varphi'^2 f_t dz = B_1^2 \frac{\pi^2}{16l^2} l \left(1 + \frac{8}{3\pi}\right) a_t; \quad (20)$$

$$B_1^2 EI_{\omega,1} \int_0^l \varphi''^2 f_{\omega} dz = B_1^2 \frac{\pi^4}{16l^4} l \left(\frac{5}{8} + \frac{2}{3\pi}\right) a_{\omega}. \quad (21)$$

Для решения подобных интегралов следует использовать свойство дистрибутивности. Также необходимо выполнить понижение степени тригонометрической функции и после осуществить интегрирование по частям [23, 24]. В Приложении к статье [8] можно найти готовые формы решения интегралов, но без биномиальных множителей.

Интеграл изгибной жесткости EI_y имеет табличное выражение:

$$A_1^2 EI_y \int_0^l u''^2 dz = A_1^2 EI_y \frac{\pi^4}{16l^4} \frac{l}{2}. \quad (22)$$

Редукционные коэффициенты представляют собой простые алгебраические зависимости вида:

$$a_t = 0,4t_t + 0,6; \quad (23)$$

$$a_{\omega} = (0,4 + 0,6t_h)^2 = 0,36t_h^2 + 0,48t_h + 0,16. \quad (24)$$

Обычно редукция кручения a_t в практических случаях не оказывает ощутимого влияния на результирующую величину критической силы, поэтому коэффициентом a_t чаще всего в практике возможно либо пренебрегать, либо принимать некоторое среднее значение, которое может быть принято, например $a_t = 0,8$. Случай, когда коэффициентом a_t нельзя пренебрегать, относится к балкам-полосам. Коэффициент редукции a_{ω} при секториальной жесткости удобно аппроксимировать в форме квадрата суммы, как это приведено в выражении (24). Полученные редукционные коэффициенты a_t и a_{ω} остаются справедливыми и для шарнирно опертых балок.

Интеграл работы внешних сил при действии сосредоточенной силы на конце стержня:

$$2Q \int_0^l \theta u''(z-l) dz = -2A_1 B_1 \frac{\pi^2}{32l^2} l^2. \quad (25)$$

Компонента учета места приложения поперечной силы по высоте сечения балки:

$$\Sigma Q e_{y,z} \theta^2 = Q B_1^2 e_{y,z}. \quad (26)$$

Складывая выражения (20)–(22) и (25), (26) вместе и подставляя в (9), получим уравнение устойчивости с двумя неизвестными постоянными коэффициентами:

$$A_1^2 EI_y \frac{\pi^4}{16l^4} \frac{l}{2} + B_1^2 \left[1,85GI_{t,1} \frac{\pi^2}{16l^2} l a_t + 0,85EI_{\omega,1} \frac{\pi^4}{16l^4} l a_{\omega} + Q e_{y,z} \right] - 2QA_1 B_1 \frac{\pi^2}{32} l^2 = 0. \quad (27)$$

Обозначим $x = A_1/B_1$ и приведем уравнение (27) к квадратному виду с одним неизвестным:

$$x^2 EI_y \frac{\pi^2}{2l^2} - xQl + \left[1,85GI_{t,1} a_t + 0,85EI_{\omega,1} \frac{\pi^2}{l^2} a_{\omega} + Q e_{y,z} \frac{16l}{\pi^2} \right] = 0. \quad (28)$$

Решать уравнение нет необходимости. Так как требуется найти критическое значение поперечной силы Q_{cr} , будет достаточным рассмотреть детерминант $D = b^2 - 4ac$, который должен быть равен нулю. В результате этого получим другое квадратное уравнение, но уже относительно критической нагрузки Q_{cr} :

$$Q^2 \frac{l^4}{2EI_y \pi^2} - Q e_{y,z} \frac{16l}{\pi^2} - \left[1,85GI_{t,1} a_t + 0,85EI_{\omega,1} \frac{\pi^2}{l^2} a_{\omega} \right] = 0. \quad (29)$$

Теперь интересуется действительный корень уравнения (29):

$$Q_{cr} = \frac{EI_y \pi^2}{l^4} \left(e_{y,z} \frac{16l}{\pi^2} + \sqrt{\left(e_{y,z} \frac{16l}{\pi^2} \right)^2 + 4 \frac{l^4}{2EI_y \pi^2} \left[1,85GI_{t,1} a_t + 0,85EI_{\omega,1} \frac{\pi^2}{l^2} a_{\omega} \right]} \right). \quad (30)$$

Выделим нормативный изгибно-крутильный параметр. Для балки переменной жесткости α вычисляется при наибольшей высоте балки:

$$\alpha = \frac{GI_{t,1} \cdot l^2}{EI_{\omega,1}}. \quad (31)$$

Если переменность отсутствует, a_t и a_{ω} будут равны единице, а геометрические характеристики вернуться к постоянным величинам, так что $I_{t,1} = I_t$, $I_{\omega,1} = I_{\omega}$ и $h_1 = h$.

Также применяем свойство $I_{\omega,1} = I_y h_1^2/4$ с тем, чтобы ввести в уравнение высоту балки h_1 :

$$Q_{cr} = \frac{EI_y h_1}{l^3} \times \left(16 \frac{e_{y,z}}{h_1} + \sqrt{\left(16 \frac{e_{y,z}}{h_1} \right)^2 + 4 \left(\frac{\pi^2}{4} a_t \alpha + a_{\omega} \pi^2 \right)} \right). \quad (32)$$

Вводим новый безразмерный параметр приложения поперечной нагрузки по высоте сечения балки. Для этого определим линейный закон изменения места приложения поперечной нагрузки по высоте сечения балки. В общем случае, когда рассматривается двутавровая балка с линейно изменяющейся высотой стенки, но постоянной шириной полки:

$$e_{y,z} = \pm 0,5h_1 \left(1 - (1-t_h) \frac{z}{l} \right). \quad (33)$$

Если нагрузка приложена на конце балки $z = l$, тогда:

$$e_{y,l} = \pm 0,5h_1 \left(1 - (1-t_h) \frac{l}{l} \right) = \pm 0,5h_1 t_h. \quad (34)$$

В безразмерной форме записи:

$$\frac{e_{y,z}}{h_1} = \pm 0,5 \left(\frac{h_0}{h_1} \right) = 0,5e_y^* t_h. \quad (35)$$

где $-1 \leq e_y^* \leq 1$; $e_y^* = 0$ — нагрузка приложена к центру тяжести/изгиба балки.

Нижний индекс z указывает на переменность параметра; $e_{y,z}$ следует определять в соответствии с положением геометрической оси балки. Уравнение справедливо в случае совпадения геометрической оси с центром тяжести. Для равномерно распределенной нагрузки при интегрировании возникает дополнительный коэффициент a_{e_y} , подобный коэффициенту редукции, способный привести положение поперечной нагрузки к эквивалентной высоте. Поперечная нагрузка может быть приложена и на некотором расстоянии от заделки a , либо рассматривается сумма сил. В таком случае следует рассматривать сумму:

$$\sum \frac{e_{y,a}}{h_1} = \sum_{i=1}^n \pm 0,5 \left(1 - (1-t_h) \frac{a_i}{l} \right). \quad (36)$$

Подставляем выражение (35) в (32):

$$Q_{cr} = \frac{EI_y h_1}{l^3} \times \left(\pm 8e_y^* t_h + \sqrt{(8e_y^* t_h)^2 + 4 \left(\frac{\pi^2}{4} a_i \alpha + a_\omega \pi^2 \right)} \right). \quad (37)$$

В статье [25] пересмотрено решение общей устойчивости балки и предложен подход, согласно которому вместо нормативного коэффициента $\psi(\alpha)$ следует ввести коэффициент ψ_0 , который позволит избежать необходимости иметь трехфакторную формулу. Для консольной балки в выражении (37) выделим:

$$\psi_0 = 2\sqrt{\frac{\pi^2}{4} a_i \alpha + a_\omega \pi^2} = \pi\sqrt{a_i \alpha + 4a_\omega}. \quad (38)$$

Как было определено ранее, текущее решение образует нижнюю границу результатов, поэтому можно ожидать, что ψ_0 оказывается немногим меньше, чем он должен быть. Для сравнения следует обратиться к полученным численным способом аппроксимациям (13) и (14):

$$Q_{cr} = \frac{EI_y h_1}{l^3} \left(8e_y^* t_h + \sqrt{(8e_y^* t_h)^2 + \psi_0^2} \right). \quad (39)$$

Радику в уравнении (39) необходимо разложить в ряд по правилу:

$$\sqrt{1+x} = 1 + \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (2n)!}{(1-2n)n^2 14^n} x^n. \quad (40)$$

Удерживаем первые два слагаемых в ряду. Последующими слагаемыми пренебрегаем в силу малости влияния. Радику представляем в виде:

$$\sqrt{b+a^2} = a\sqrt{1+\frac{b}{a^2}} = a\left(1+\frac{b}{2a^2}\right). \quad (41)$$

С учетом этого уравнение критической силы (39) преобразуется с разделением на два коэффициента. Первый коэффициент ψ_0 определяет изгибно-крутильную характеристику сопротивления консольной балки, когда поперечная нагрузка приложена точно по геометрической оси, совпадающей с центром тяжести. Второй коэффициент η корректирует изгибно-крутильную сопротивляемость балки в зависимости от места приложения поперечной нагрузки по высоте балки:

$$Q_{cr} = \frac{EI_y h_1}{l^3} \left(\psi_0 + \left[\frac{(8e_y^* t_h)^2}{2\psi_0} + 8e_y^* t_h \right] \right) = \frac{EI_y h_1}{l^3} (\psi_0 + \eta). \quad (42)$$

Рассмотрим коэффициент учета влияния места приложения поперечной нагрузки по высоте отдельно:

$$\eta = \frac{(8e_y^* t_h)^2}{2\psi_0} + 8e_y^* t_h. \quad (43)$$

При приложении нагрузки в центре тяжести имеем $e_y^* = 0$, $\eta = 0$ и $\psi = \psi_0$. Если построить график (рис. 6, а) зависимости $\psi(\psi_0)$ для выражения (42), можно убедиться в том, что это линейное алгебраическое уравнение, которое скалируется коэффициентами e_y^* и t_h . Если нагрузка прикладывается к верхнему поясу консольной балки ($-e_y^*$), тогда:

$$\psi = \psi_0 - 5t_h. \quad (44)$$

Для нижнего пояса с плюсом ($+e_y^*$):

$$\psi = \psi_0 + 11t_h. \quad (45)$$

Используя интерполяционный полином Лагранжа – Ньютона [27] в форме неполного квадратного уравнения (так как одна из координат $[0; 0]$), получим аппроксимацию без участия ψ_0 , которая позволит определить значения и для промежуточных ординат приложения нагрузки:

$$\eta_1 = 3e_y^{*2} t_h^2 + 8e_y^* t_h. \quad (46)$$

Промежуточные значения η по высоте сечения балки устанавливаются из линейной зависимости $-1 \leq e_y^* \leq 1$. По графику, показанному на рис. 6, b, можно проследить качественность такого подхода. Благодаря введенной функции теперь видно, что при приложении поперечной нагрузки к центру тяжести и смещении ее к сжатому поясу зависимость сохраняется нелинейной. Но для растянутого пояса зависимость переходит к линейному виду. Данная особенность

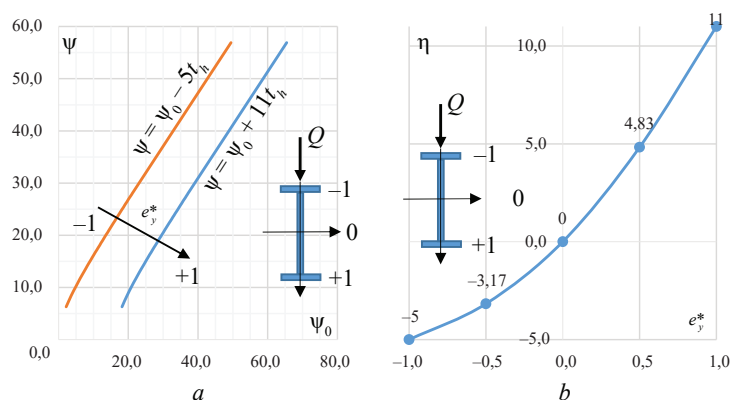


Рис. 6. Графики зависимости изгибно-крутильной устойчивости двутавровой балки под действием сосредоточенной силы

Fig. 6. Flexural-torsional buckling curves for an I-beam under a concentrated load

Табл. 2. Геометрические характеристики балки

Table 2. Geometrical properties of the beam

h_2 , м / m	EI_y , кНм ² / kNm ²	$GI_{t,z}$, кНм ² / kNm ²	$EI_{o,z}$, кНм ⁴ / kNm ⁴	$t_h = h_0/h_1$	$t_t = I_{t,0}/I_{t,1}$
$h_1 = 0,4$	344	7,58	13,76	0,5	0,85
$h_0 = 0,2$		6,43	3,44		

и вид кривых сохраняются и для равномерно распределенной нагрузки. Уравнение (46) позволяет определить критическую силу, когда поперечная сила находится на любой отметке по высоте поперечного сечения, а не только приложенная к верхнему или нижнему поясу. И, как следствие этого, уравнение (42) становится обобщенным. Такое решение не требует частных формул, как это сейчас принято в своде правил.

Итак, в сокращенной форме уравнение критической поперечной силы будет записано следующим образом:

$$Q_{cr} = \frac{EI_y h_1}{l^3} (\psi_0 + \eta_1) = \frac{EI_y h_1}{l^3} \psi. \quad (47)$$

Для проверки уравнения (47) рассмотрим сварную двутавровую балку с переменной высотой стенки, показанную на рис. 5, б. Требуется определить критическую поперечную силу с учетом места приложения нагрузки по высоте поперечного сечения. Сечения стенки и полок: $t_w = 0,6$ см; $h_{w,0} = 19$ см; $h_{w,1} = 39$ см; $t_f = 1$ см; $b_f = 10$ см. Длина консоли $l = 4$ м. Для удобства необходимые геометрические характеристики подсчитаны и сведены в табл. 2.

Алгоритм расчета

1. Вычисляем редуцированные коэффициенты a_t и a_o :

$$a_t = 0,4 \cdot 0,85 + 0,6 = 0,94;$$

$$a_o = (0,4 + 0,6 \cdot 0,5)^2 = 0,49.$$

2. Вычисляем изгибно-крутильный параметр α :

$$\alpha = \frac{7,58 \cdot 4^2}{13,76} = 8,81.$$

3. Вычисляем изгибно-крутильную характеристику балки ψ_0 :

$$\psi_0 = \pi \sqrt{0,94 \cdot 8,81 + 0,49 \cdot 4} = 10.$$

4. Подсчитываем критическую силу:

$$Q_{cr} = \frac{343 \cdot 0,4}{4^3} (10 + 0) = 21,4 \text{ кН.}$$

Расчет в ЛИРА-САПР показывает величину 24,6 кН. Для верификации создана модель из пластин с размером конечного элемента КЭ44 с частой сеткой 10×10 мм.

5. Определяем поправку η . Если нагрузка прикладывается к верхнему поясу:

$$\eta_1 = 3 \cdot 0,5^2 - 8 \cdot 0,5 = -3,25;$$

$$Q_{cr} = \frac{343 \cdot 0,4}{4^3} (10 - 3,25) = 14,5 \text{ кН.}$$

Расчет в ЛИРА-САПР показывает 16,1 кН.

Нижний пояс:

$$\eta_1 = 3 \cdot 0,5^2 + 8 \cdot 0,5 = 4,5;$$

$$Q_{cr} = \frac{343 \cdot 0,4}{4^3} (10 + 4,5) = 31,1 \text{ кН.}$$

Расчет в ЛИРА-САПР показывает 30,6 кН.

Двухтавровая консольная балка переменной высоты под действием равномерно распределенной нагрузки q_y

Расчетная схема балки показана на рис. 7. Равномерно распределенная нагрузка прикладывается на некотором расстоянии e_y от центра тяжести.

Двухтавровая балка с линейно изменяющейся высотой стенки, подверженная распределенной поперечной нагрузке, требует вычисления сложных интегралов в части работы внешних сил. Ранее уже было сказано, что при линейном изменении высоты балки по длине e_y определяется по уравнению (33). Интегралы внутренней работы сил остаются прежними:

$$-q_y \int_0^l \theta u''(z-l)^2 dz = -0,28q_y A_1 B_1 \frac{\pi^2}{16l^2} l^3; \quad (48)$$

$$q_y B_1^2 \int_0^l e_{y,z} \varphi^2 dz = 0,22q_y B_1^2 h_1 l e_y^* a_{e_y}, \quad (49)$$

где $a_{e_y} = 0,75t_h + 0,25$ — коэффициент приведения поперечной нагрузки к эквивалентной высоте.

Переносим интегралы внутренней работы сил из предыдущего решения и дополняя его (48) и (49), получим квадратное уравнение относительно постоянных неизвестных коэффициентов A_1 и B_1 :

$$x^2 EI_y \frac{\pi^2}{2l^2} - x 0,28q_y l^2 + \left[1,85GI_{t,1} a_t + 0,85EI_{o,1} \frac{\pi^2}{l^2} a_o + 0,35q_y l^2 h_1 e_y^* a_{e_y} \right] = 0. \quad (50)$$

Методология решения уравнения повторяется. Опуская детали, записываем конечное уравнение критической нагрузки $q_{y,cr}$:

$$q_{y,cr} = \frac{EI_y h_1}{l^4} \left(44e_y^* a_{e_y} + \sqrt{\left(44e_y^* a_{e_y} \right)^2 + 16\psi_0^2} \right). \quad (51)$$

Полученное уравнение (51) аналогично (39) и отличается числовыми коэффициентами и новым параметром a_{e_y} . В сокращенной форме записи:

$$q_{y,cr} = \frac{EI_y h_1}{l^4} (4\psi_0 + \eta_2), \quad (52)$$

где $\eta_2 = 18e_y^{*2} a_{e_y}^2 + 42e_y^* a_{e_y}$ — коэффициент влияния места приложения равномерно распределенной нагрузки по высоте балки.

Для апробации формулы (52) рассмотрим балку, показанную на рис. 6. Геометрические параметры балки берутся из предыдущего примера. Алгоритм расчета полностью повторяется. Поэтому записываем сразу:

$$q_{y,cr} = \frac{343 \cdot 0,4}{4^4} (4 \cdot 10 + 0) = 21,4 \text{ кН/м.}$$

Расчет в ЛИРА-САПР показывает критическое значение нагрузки 25,1 кН/м:

$$a_{e_y} = 0,75 \cdot 0,5 + 0,25 = 0,625;$$

$$\eta_2 = 18 \cdot 0,625^2 - 42 \cdot 0,625 = -19,2;$$

$$q_{y,cr} = \frac{343 \cdot 0,4}{4^4} (4 \cdot 10 - 19,2) = 11,1 \text{ кН/м.}$$

Расчет в ЛИРА-САПР показывает 13,9 кН/м:

$$\eta_2 = 18 \cdot 0,625^2 + 42 \cdot 0,625 = 33,3;$$

$$q_{y,cr} = \frac{343 \cdot 0,4}{4^4} (4 \cdot 10 + 33,3) = 39,3 \text{ кН/м.}$$

Расчет в ЛИРА-САПР показывает 35,4 кН/м.

При удержании только первого слагаемого в тригонометрическом ряду (10) и (12) были получены выражения критических нагрузок Q_{cr} и $q_{y,cr}$. Результаты расчета по формулам (47) и (52) предсказывают значения критических нагрузок близкие к численным с погрешностью до 10 %. Увеличения точности можно достичь путем корректирования числовых коэффициентов, которые могут быть взяты из аппроксимаций $\gamma(\alpha)$ (13) и $m(\alpha)$ (14). Они демонстрируют близкое расположение к значениям из метода конечных разностей.

Инженерный метод расчета балки на общую устойчивость

Согласно нормативной методике расчета балки на общую устойчивость, критическую силу и равномерно распределенную нагрузку следует привести к упругому критическому моменту:

$$M_{cr} = Ql = \frac{EI_y h_1}{l^2} (\psi_0 + \eta_1); \quad (53)$$

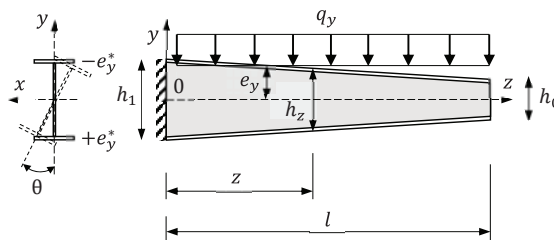


Рис. 7. Балка переменной жесткости под действием равномерно распределенной нагрузки

Fig. 7. Web-tapered cantilever I-beam under a uniformly distributed load

$$M_{cr} = \frac{q_{y,cr} l^2}{2} = \frac{EI_y h_1}{2l^2} (4\psi_0 + \eta_2). \quad (54)$$

В соответствии с требованиями раздела 8.4 СП 16.13330.2017 расчет на устойчивость двутавровых стальных балок 1-го класса при изгибе в плоскости стенки, совпадающей с плоскостью симметрии сечения, необходимо выполнять по формуле:

$$\frac{M_x}{\phi_b W_x R_y} \leq 1, \quad (55)$$

где ϕ_b — коэффициент устойчивости при изгибе (коэффициент уменьшения допускаемых напряжений). Для симметричного профиля:

$$\phi_b = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_T} = \frac{M_{cr} h_1}{2I_{x,1} R_y} \gamma_c, \quad (56)$$

где $\gamma_c = 0,87$ — обязательный и постоянный коэффициент, учитывающий в бифуркационном решении геометрические несовершенства.

Подставляя уравнение (53) или (54) в (56), вы-

числяем коэффициент устойчивости и выполняем проверку условия по выражению (55).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрированный способ расчета на устойчивость консольной балки отличается универсальностью и гибкостью. Его простота и органичность традиционному подходу в проверке устойчивости балок позволяет отказаться от частных формул, избежать необходимости выполнять численный анализ, а также связать балки постоянной и переменной жесткости в одно единственное уравнение путем редукции геометрических характеристик формульными коэффициентами. Показанный способ предоставляет возможность более точно определять изгибно-крутильную сопротивляемость балки благодаря четкому разделению коэффициентами ψ_0 и η . Уточнение уравнений критических нагрузок с целью достижения большей точности возможно выполнить посредством корректирования числовых коэффициентов, взятых из уравнений $\gamma(\alpha)$ и $m(\alpha)$ из численного анализа.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. М. : Физматгиз, 1959. 574 с.
2. Бруде Б.М. Предельные состояния стальных балок. М. : Стройиздат, 1953. 216 с.
3. Trahair N.S. Bending and buckling of tapered steel beam structures research. Research report R939. School of Civil Engineering, The University of Oklahoma, 2013. 26 p.
4. Trahair N.S. Lateral buckling of tapered members // Engineering Structures. 2017. Vol. 151. Pp. 518–526. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.08.038
5. Trahair N.S., Ansourian P. In-plane behaviour of web-tapered beams // Engineering Structures. 2016. Vol. 108. Pp. 47–52. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.11.010
6. Trahair N.S. Interaction buckling of tapered beams // Engineering Structures. 2014. Vol. 62–63. Pp. 174–180. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.01.040
7. Trahair N.S. Flexural-torsional buckling of structures. London, 1993. DOI: 10.1201/9781482271218
8. Wang C.M., Kitipornchai S. On stability of mono-symmetric cantilevers // Engineering Structures. 1986. Vol. 8. Issue 3. Pp. 169–180. DOI: 10.1016/0141-0296(86)-90050-7
9. Andrade A., Camotim D., Dinis P.B. Lateral-torsional buckling of singly symmetric web-tapered thin-walled I-beams: 1D model vs. shell FEA // Computers & Structures. 2007. Vol. 85. Issue 17–18. Pp. 1343–1359. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.08.079
10. Andrade A., Camotim D. Lateral-torsional buckling of singly symmetric tapered beams: theory and applications // Journal of Engineering Mechanics. 2005. Vol. 131. Issue 6. Pp. 586–597. DOI: 10.1061/(asce)0733-9399(2005)131:6(586)
11. Dowsell B. Lateral-torsional buckling of wide flange cantilever beams // Engineering Journal. 2004. Vol. 41. Issue 2. Pp. 85–91. DOI: 10.62913/engj.v41i2.825
12. Nethercot D.A. The effective lengths of cantilevers as governed by lateral buckling // The Structural Engineer. 1973. Vol. 51. Issue 5. Pp. 161–168.
13. Nethercot D.A., Rockey K.C. A unified approach to the elastic lateral buckling of beams // Engineering Journal. 1972. Vol. 9. Issue 3. Pp. 96–107. DOI: 10.62913/engj.v9i3.188
14. Nethercot D.A. Lateral buckling of tapered beams // IABSE Publications. 1973. Vol. 33–II. Pp. 173–192.
15. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. М. : Гостехиздат, 1955. 567 с.
16. Ruocco E., Reddy J. Analytical solutions of Reddy, Timoshenko and Bernoulli beam models: A comparative analysis // European Journal of Mechanics — A/Solids. 2023. Vol. 99. P. 104953. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2023.104953. EDN JACPYK.
17. Блейх Ф. Устойчивость металлических конструкций. М. : Физматгиз, 1959. 544 с.
18. Александров А.В., Потанов В.Д. Сопротивление материалов. Основы теории упругости и пластичности. М. : Высшая школа, 2007. 400 с.
19. Ozbasaran H., Aydin R., Dogan M. An alternative design procedure for lateral-torsional buckling of cantilever I-beams // Thin-Walled Structures. 2015. Vol. 90. Pp. 235–242. DOI: 10.1016/j.tws.2015.01.021

20. Xiao G., Ho S., Papangelis J.P. Semi analytical solutions for flexural-torsional buckling of thin-walled cantilever beams with doubly symmetric cross-sections // *Structural Engineering and Mechanics*. 2023. Vol. 87. Issue 6. Pp. 541–554. DOI: 10.12989/sem.2023.87.6.541

21. Timoshenko S.P., Gere J.M. *Theory of elastic stability*. 2nd ed. New York : McGraw-Hill, 1961. 560 p.

22. Poley S. Lateral buckling of cantilevered I-beams under uniform load // *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1956. Vol. 121. Issue 1. Pp. 786–790. DOI: 10.1061/TACEAT.0007376

23. Градштейн И.С., Рыжик И.М. *Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений*. М. : Физматгиз, 1963. 1100 с.

24. Ильюшенко А.О. Развитие инженерной методики расчета устойчивости плоской формы изгиба двутавровой балки // *Вестник НИЦ Строительство*. 2025. № 3 (46). С. 22–42. DOI: 10.37538/2224-9494-2025-3(46)-22-42. EDN FKKCEI.

25. Ильин В.П. *Численные методы решения задач строительной механики*. Минск : Вышэйшая школа, 1990. 349 с.

Поступила в редакцию 3 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 10 ноября 2025 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: Александр Олегович Ильюшенко — инженер промышленного и гражданского строительства, ведущий инженер архитектурно-строительного отдела; Территориальный проектный институт «Хабаровскпромпроект» (ТПИ «Хабаровскпромпроект»); 680000, г. Хабаровск, Усурийский бульвар, д. 2; revivaltree@gmail.com.

REFERENCES

1. Vlasov V.Z. *Thin-walled elastic rods*. Moscow, Fizmatgiz, 1959; 574. (rus.).

2. Broude B.M. *Limit states of steel beams*. Moscow, Stroyizdat, 1953; 216. (rus.).

3. Trahair N.S. Bending and buckling of tapered steel beam structures research. *Research report R939*. School of Civil Engineering, The University of Oklahoma, 2013; 26.

4. Trahair N.S. Lateral buckling of tapered members. *Engineering Structures*. 2017; 151:518-526. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.08.038

5. Trahair N.S., Ansourian P. In-plane behaviour of web-tapered beams. *Engineering Structures*. 2016; 108:47-52. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.11.010

6. Trahair N.S. Interaction buckling of tapered beams. *Engineering Structures*. 2014; 62-63:174-180. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.01.040

7. Trahair N.S. *Flexural-torsional buckling of structures*. London, 1993. DOI: 10.1201/9781482271218

8. Wang C.M., Kitipornchai S. On stability of mono-symmetric cantilevers. *Engineering Structures*. 1986; 8(3):169-180. DOI: 10.1016/0141-0296(86)90050-7

9. Andrade A., Camotim D., Dinis P.B. Lateral-torsional buckling of singly symmetric web-tapered thin-walled I-beams: 1D model vs. shell FEA. *Computers & Structures*. 2007; 85(17-18):1343-1359. DOI: 10.1016/j.compstruc.2006.08.079

10. Andrade A., Camotim D. Lateral-torsional buckling of singly symmetric tapered beams: theory and applications. *Journal of Engineering Mechanics*. 2005; 131(6):586-597. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:6(586)

11. Dowswell B. Lateral-torsional buckling of wide flange cantilever beams. *Engineering Journal*. 2004; 41(2):85-91. DOI: 10.62913/engj.v41i2.825

12. Nethercot D.A. The effective lengths of cantilevers as governed by lateral buckling. *The Structural Engineer*. 1973; 51(5):161-168.

13. Nethercot D.A., Rockey K.C. A unified approach to the elastic lateral buckling of beams. *Engineering Journal*. 1972; 9(3):96-107. DOI: 10.62913/engj.v9i3.188

14. Nethercot D.A. Lateral buckling of tapered beams. *IABSE Publications*. 1973; 33-II:173-192.

15. Timoshenko S.P. *Stability of elastic systems*. Moscow, Gostekhizdat, 1955; 567. (rus.).

16. Ruocco E., Reddy J. Analytical solutions of Reddy, Timoshenko and Bernoulli beam models: A comparative analysis. *European Journal of Mechanics — A/Solids*. 2023; 99:104953. DOI: 10.1016/j.euro-mechsol.2023.104953. EDN JACPYK.

17. Bleich F. *Stability of steel constructions*. Moscow, Fizmatgiz, 1959; 544. (rus.).

18. Aleksandrov A.V., Potapov V.D. *Strength of Materials. Fundamentals of the Theory of Elasticity and Plasticity*. Moscow, Higher School, 2007; 400. (rus.).

19. Ozbasaran H., Aydin R., Dogan M. An alternative design procedure for lateral-torsional buckling of cantilever I-beams. *Thin-Walled Structures*. 2015; 90:235-242. DOI: 10.1016/j.tws.2015.01.021

20. Xiao G., Ho S., Papangelis J.P. Semi analytical solutions for flexural-torsional buckling of thin-walled cantilever beams with doubly symmetric cross-sections. *Structural Engineering and Mechanics*. 2023; 87(6):541-554. DOI: 10.12989/sem.2023.87.6.541

21. Timoshenko S.P., Gere J.M. *Theory of elastic stability*. 2nd Ed. New York, McGraw-Hill, 1961; 560.
22. Poley S. Lateral buckling of cantilevered I-beams under uniform load. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1956; 121(1):786-790. DOI: 10.1061/TACEAT.0007376
23. Gradstein I.S., Ryzhik I.M. *Tables of integrals, sums, series and products*. Moscow, Fizmatgiz, 1963; 1100. (rus.).
24. Ilyushenkov A.O. Development of engineering methodology for calculating the plane bending stability of an I-beam. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025; 3(46):22-42. DOI: 10.37538/2224-9494-2025-3(46)-22-42. EDN FKKCEI. (rus.).
25. Ilyin V.P. *Numerical methods for solving problems of structural mechanics*. Minsk, Higher School, 1990; 349. (rus.).

Received November 3, 2025.

Adopted in revised form on November 10, 2025.

Approved for publication on January 29, 2026.

BIOTNOTES: **Alexander O. Ilyushenkov** — industrial and civil construction engineer, leading engineer of the Architectural and Construction Department; **Territorial Design Institute “Khabarovskpromproekt”**; 2 Ussuriysky boulevard, Khabarovsk, 680000, Russian Federation; revivaltree@gmail.com.

Реализация эквипотенциальных поверхностей в структурно-неоднородных стержнях при вариационных постановках задач оптимизации

Андрей Викторович Мищенко^{1,2}, Максим Сергеевич Вешкин¹

¹ Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин);
г. Новосибирск, Россия;

² Новосибирское высшее военное командное ордена Жукова училище; г. Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена вариационная постановка задачи оптимизации геометрической конфигурации слоисто-неоднородного стержня при условии постоянства суммарной стоимости материалов. В качестве критерия оптимальности принят интегральный критерий минимума энергии деформации при варьировании геометрических функций, профилирующих слои стержня. В настоящее время данный подход, применяемый в однородных системах, требует развития и распространения на сложные неоднородные среды, разработки методики использования в строительных конструкциях.

Материалы и методы. С применением математической модели стержня Тимошенко приведены формулы для основных компонент напряжений и жесткостных характеристик нулевого, первого и второго порядков. Сформулированы энергетический функционал и ограничение на суммарную стоимость материалов. Получены уравнения Эйлера при варьировании геометрических функций.

Результаты. Решены задачи оптимизации слоистого стержня при варьировании ширины и толщины слоев для симметричной и произвольной структур. Исследованы случаи изгиба, растяжения, поперечного сдвига и совместного изгиба с растяжением. Аналитически доказано, что во всех рассмотренных случаях в системе формируются поверхности с равным уровнем удельной энергии деформации. Показано, что изопериметрическая вариационная постановка приводит к минимальной стоимости материалов конструкции.

Выводы. Вариационная постановка с одним ограничением на суммарную стоимость материалов, необходимым по смыслу задачи, дает глобальный минимум функционала энергии деформации и стоимости материалов системы и отражает так называемый эталонный проект. Знание такого проекта является ценным и полезным с практической точки зрения. В оптимальной системе формируются эквипотенциальные поверхности с одинаковым значением удельной энергии деформации. Их форма и расположение определяются действующими усилиями и структурой системы. Из интегрального энергетического критерия вытекают практические критерии выравнивания удельной энергии деформации, а также основного напряжения либо деформации на поверхностях областей с варьируемыми размерами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: структурно-неоднородный стержень, оптимизация неоднородных систем, вариационная оптимизация, критерий минимума энергии деформации, эквипотенциальные поверхности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мищенко А.В., Вешкин М.С. Реализация эквипотенциальных поверхностей в структурно-неоднородных стержнях при вариационных постановках задач оптимизации // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 714–724. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.714-724

Автор, ответственный за переписку: Максим Сергеевич Вешкин, m.veshkin@sibstrin.ru.

Realization of equipotential surfaces in structurally inhomogeneous rods in variational formulations of optimization problems

Andrey V. Mishchenko^{1,2}, Maxim S. Veshkin¹

¹ Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin); Novosibirsk, Russian Federation;

² Novosibirsk Higher Military Command Order of Zhukov School; Novosibirsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A variational formulation of the problem of optimizing the geometric configuration of a layered heterogeneous rod under the condition of constant total cost of materials is considered. The integral criterion of minimum deformation energy is adopted as the optimality criterion when varying the geometric functions profiling the rod layers. Currently, this approach, applied in homogeneous systems, requires development and extension to complex heterogeneous environments, and the development of methods for application in building structures.

Materials and methods. Using the mathematical model of the Timoshenko rod, formulas are given for the main components of stress and rigidity characteristics of zero, first and second orders. An energy functional and a constraint on the total cost of materials were formulated. Euler equations were obtained for varying geometric functions.

Results. The optimization problems of a layered rod by varying the width and thickness of layers for symmetrical and arbitrary structures are solved. The cases of bending, tension, transverse shear and combined bending with tension were investigated. It has been analytically proven that in all the cases considered, surfaces with an equal level of specific deformation energy are formed in the system. It is shown that the isoperimetric variational formulation leads to the minimum cost of the construction's materials.

Conclusions. A variational formulation with one constraint on the total cost of materials, necessary according to the meaning of the problem, provides a global minimum of the functional of the deformation energy and the cost of materials of the system and reflects, the so-called, reference project. Knowledge of such a project is valuable and useful from a practical point of view. In an optimal system, equipotential surfaces with identical specific deformation energy values are formed. Their shape and location are determined by the emerging efforts and the structure of the system. From the integral energy criterion follow practical criteria for equalizing the specific energy of deformation, as well as the main stress or deformation on the surfaces of areas received by varying of dimensions.

KEYWORDS: structurally inhomogeneous rod, optimization of inhomogeneous systems, variational optimization, minimum deformation energy criterion, equipotential surfaces

FOR CITATION: Mishchenko A.V., Veshkin M.S. Realization of equipotential surfaces in structurally inhomogeneous rods in variational formulations of optimization problems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):714-724. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.714-724 (rus.).

Corresponding author: Maksim S. Veshkin, m.veshkin@sibstrin.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Вариационные постановки задач механики, выполненные на основе использования энергетических функционалов, отражают один из фундаментальных и универсальных подходов, применяемый при построении методов расчета строительных конструкций. Особенно эффективным он становится при исследовании математических моделей новых конструктивных форм и структурно-неоднородных деформируемых систем [1–4]. Кроме решений прямых задач, вариационные принципы находят применение в обратных задачах — задачах оптимизации конструкций, имеющих широкий спектр направлений, которые определяются выбором критерия оптимизации, варьируемыми параметрами и накладываемыми на расчетную схему ограничениями [5–10]. В них, наряду с традиционными практическими требованиями прочности, жесткости, устойчивости, долговечности, динамической виброзащищенности и другими, рассматриваются также вопросы: поиска наилучшей геометрической конфигурации [1, 2], структуры и топологии [11] системы, межфазной прочности [12, 13], способы улучшения других специфических свойств и характеристик [14].

Эффективным и универсальным инструментом для решения подобных задач является энергетический подход, основанный на интегральном критерии минимума потенциальной энергии деформируемой системы [2, 8, 10, 12, 13]. В подтверждение может быть приведено высказывание Альберта Эйнштейна: «Энергия — самая важная сохраняющаяся величина не только в механике, но и в физике вообще. Но более проста и наглядна величина, которая называется работой». В настоящее время этот подход требует развития, в частности: распространения на сложные неоднородные среды [10, 15–23], обоснования и совершенствования критериев оптимальности, установления связей с технико-экономическими кри-

териями, разработки методики применения к распространенным строительным конструкциям [7].

В данной статье рассматриваются вопросы оптимизации стержневых структурно-неоднородных систем на основе вариационного подхода, особенности возникающего напряженно-деформированного состояния и распределения удельной потенциальной энергии деформации в объеме оптимальной системы. При минимальном числе ограничений, содержащих лишь требование о постоянстве расхода (стоимости) материалов, для этих постановок специфично формирование в неоднородной структуре множества *эквипотенциальных поверхностей* (ЭПП) и областей. Это позволяет обосновать использование локальных критериев оптимальности для параметров напряженного и деформированного состояния.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Математическая модель структурно-неоднородного стержня

Неоднородный стержень — элемент плоской стержневой системы, имеет поперечно-слоистую структуру, образованную соединением s однородных слоев. В локальной системе координат x, y, z отсчетная геометрическая ось стержня совмещена с осью x , структура стержня обладает симметрией относительно вертикальной плоскости x, y , в которой к стержню приложены нагрузки (рис. 1). K -й слой, имеющий в поперечном сечении прямоугольную форму, характеризуется: шириной $b_k(x)$, высотой $h_k(x)$, модулями упругости E_k, G_k . Границы слоев обозначим через $y_k(x)$, ($k = 1, \dots, s + 1$). Также в поперечном сечении возможны включения иной формы, например круговой (для арматуры).

В работах [24, 25] приведены основные соотношения для слоистого стержня Тимошенко, на базе которых получены расчетные зависимости, связи-

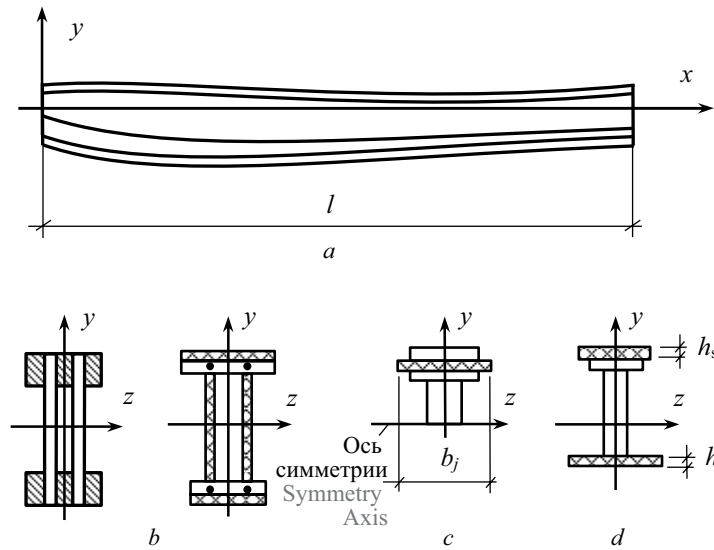


Рис. 1. Расчетная схема структурно-неоднородного стержня (а) с вариантами поперечных сечений (b–d)

Fig. 1. Calculation scheme of a structurally uniform rod (a) with variants of cross-sections (b–d)

вающие обобщенную осевую деформацию ε_0 , кривизну κ и осредненный сдвиг γ_0 с усилиями M, N, Q :

$$\begin{cases} D_A \varepsilon_0 - D_S \kappa = N; \\ -D_S \varepsilon_0 + D_I \kappa = M; \\ D_Q \gamma_0 = Q, \end{cases} \quad (1)$$

а также формулы для наиболее значимых компонент напряжений в k -м слое:

$$\begin{aligned} \sigma_{x,k}^{(N)} &= N \frac{E_k (D_I - y D_S)}{D}; \\ \sigma_{x,k}^{(M)} &= -M \frac{E_k (y D_A - D_S)}{D}; \\ \tau_{xy,k}^{(Q)} &= \frac{Q}{b_k} \frac{D_A D_S^{sec} - D_S D_A^{sec}}{D}; \quad D = D_I D_A - D_S^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь для s -слойного стержня введены жесткостные характеристики сечения нулевого, первого и второго порядков:

$$\begin{aligned} D_A(x) &= \sum_{k=1}^s E_k \int_{y_k}^{y_{k+1}} b_k dy; \quad D_S(x) = \sum_{k=1}^s E_k \int_{y_k}^{y_{k+1}} b_k y dy; \\ D_I(x) &= \sum_{k=1}^s E_k \int_{y_k}^{y_{k+1}} b_k y^2 dy; \\ D_A^{sec}(x, y) &= \int_y^{y_{s+1}} E_k(y) b_k dy; \\ D_S^{sec}(x, y) &= \int_y^{y_{s+1}} E_k(y) b_k y dy. \end{aligned} \quad (4)$$

Для касательных напряжений, наряду с формулой (3), получены также приближенные зависимости на основе аппроксимации погонных сдвигающих сил:

$$\tau_{yx,k}^{(Q)} = \frac{Q f_\tau(y)}{b_k F_\tau}; \quad F_\tau = \int_{y_1}^{y_{s+1}} f_\tau dy; \quad (5)$$

$$D_Q = \frac{F_\tau^2}{\sum_{k=1}^s \int_{y_k}^{y_{k+1}} \frac{f_\tau^2}{b_k G_k} dy} \quad (6)$$

где $f_\tau(y)$ — заданная безразмерная функция аппроксимации сдвигающих сил, удовлетворяющая условиям на поверхностях $y = y_1(x), y = y_{s+1}(x)$.

Критерий оптимальности конфигурации плоского неоднородного стержня запишем в виде энергетического функционала [10]:

$$\begin{aligned} W(\mathbf{P}) &= \frac{1}{2} \int_l M \kappa dx + \frac{1}{2} \int_l N \varepsilon_0 dx + \\ &+ \frac{1}{2} \int_l Q \gamma_0 dx \rightarrow \min. \end{aligned}$$

После подстановки в него деформации ε_0 и кривизны κ из выражения (1) получим:

$$\begin{aligned} W(\mathbf{P}) &= \int_l \frac{1}{2D} \left(M^2 D_A + M N D_S + \right. \\ &\left. + N^2 D_I + Q^2 \frac{D}{D_0} \right) dx \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (7)$$

Наличие слагаемого, содержащего $M \cdot N$, отражает связанность компонент энергии деформации изгиба и растяжения в слоистом стержне произвольной структуры. В структурах, обладающих нулевой жесткостью первого порядка ($D_S = 0$), эта зависимость отсутствует.

Варьируемыми величинами в выражении (7) являются геометрические функции $b_k(x), h_k(x), y_k(x), y_{k+1}(x), (k = 1, \dots, s)$, отражающие поперечные размеры и (или) координаты границ слоев стержня, объединенные в вектор-функцию $\mathbf{P} = \{p_i\}$ с произ-

вольным набором компонент. Данные функции используются в жесткостных характеристиках (4).

Условия связи варьируемых функций сформулируем в виде ограничения — равенства на стоимость материалов слоистого стержня:

$$C(\mathbf{P}) = \sum_{k=1}^s c_k \gamma_k \int_{l_k} b_k (y_{k+1} - y_k) dx = C_\Sigma = \text{const}, \quad (8)$$

где c_k, γ_k — удельные стоимость и вес k -го материала. Как частные случаи, из условия (8) вытекают ограничения на массу и объем стержня.

Решению вариационной задачи (7), (8) соответствует минимум лагранжиана:

$$L(\mathbf{P}) = \frac{1}{2} (M\kappa + N\varepsilon_0 + Q\gamma_0) + \lambda_1 \sum_{k=1}^s c_k \gamma_k b_k (y_{k+1} - y_k) \rightarrow \min \quad (9)$$

с m уравнениями Эйлера:

$$\frac{\partial L}{\partial p_i} = 0, \quad (i = 1, \dots, m). \quad (10)$$

В исследованиях [2, 26, 27] продемонстрировано, что в однородных системах такая постановка (при $c_k = \gamma_k = 1$) приводит к конструкции минимального объема. Рассмотрим решение данной оптимизационной задачи для различных вариантов расчетных схем слоистых стержней в рамках общей модели, показанной на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изгиб стержня симметричной структуры

Полагаем, что при наличии изгибающего момента $M(x)$ отсутствуют усилия N, Q . Структура имеет горизонтальную плоскость симметрии и содержит s слоев, расположенных выше, и s таких же слоев ниже данной плоскости (рис. 1, c). В качестве искомой варьируемой функции примем ширину некоторого j -го слоя $b_j(x)$, расположенного выше плоскости симметрии. Аналогично будет варьироваться и ширина соответствующего симметричного слоя снизу.

Жесткостные характеристики представим в виде:

$$D_A(x) = 2 \left[D_{A_0} + E_j b_j (y_{j+1} - y_j) \right]; \\ D_S(x) = 0; \\ D_I(x) = 2 \left[D_{I_0} + \frac{1}{3} E_j b_j (y_{j+1}^3 - y_j^3) \right].$$

Здесь и далее через $D_{A_0}(x), D_{S_0}(x), D_{I_0}(x)$ обозначены жесткостные характеристики (4) части сечения, состоящего из слоев с неварьируемыми размерами. Определив кривизну κ из выражения (1), имеем функционал (9):

$$L(\mathbf{P}) = \frac{M^2}{2D_I} +$$

$$+ 2\lambda_1 \sum_{k=1}^s c_k \gamma_k b_k (y_{k+1} - y_k) \rightarrow \min$$

с уравнением Эйлера (10) при варьировании ширины j -го слоя b_j :

$$\frac{M^2 E_j (y_{j+1}^2 + y_{j+1} y_j + y_j^2)}{6D_I^2} - \lambda_1 c_j \gamma_j = 0. \quad (11)$$

С учетом формулы для напряжения (2) получим из формулы (11) удельную энергию деформации в произвольном k -м слое:

$$W_k(x, y) = \frac{[\sigma_{x,k}^{(M)}]^2}{2E_k} = 3\lambda_1 c_j \gamma_j \frac{E_k}{E_j} \frac{y^2}{y_{j+1}^2 + y_{j+1} y_j + y_j^2}. \quad (12)$$

Дальнейшие результаты будем рассматривать при условии пропорциональности (подобия) координат границ варьируемого j -го слоя:

$$\frac{y_{j+1}(x)}{y_j(x)} = p = \text{const}. \quad (13)$$

Тогда выражение удельной энергии (12) примет вид:

$$W_k(x, y) = \frac{[\sigma_{x,M}^{(k)}]^2}{2E_k} = 3\lambda_1 c_j \gamma_j \frac{E_k}{E_j} \left(\frac{y}{y_j} \right)^2 \frac{1}{1+p+p^2}. \quad (14)$$

Если дополнительно ввести относительную поперечную координату $\zeta = y/y_j$, то удельная энергия

$$W_k(\zeta) = \frac{[\sigma_{x,M}^{(k)}]^2}{2E_k} = \frac{E_k}{E_j} \frac{3\lambda_1 c_j \gamma_j}{1+p+p^2} \zeta^2 \quad (15)$$

теряет зависимость от координаты x . Выражение (15) показывает, что в j -м слое в результате оптимизации стержня возникают цилиндрические поверхности с образующей, перпендикулярной плоскости изгиба, при постоянных значениях координаты ζ , являющиеся поверхностями постоянного уровня удельной энергии деформации — *эквипотенциальными поверхностями*. Наибольшему уровню энергии $W(\zeta) \rightarrow \max$ в j -м слое отвечает поверхность его наружной границы y_{j+1} при $\zeta = 1$. Формирование ЭПП происходит и в других слоях системы.

На рис. 2 на примере четырехслойного стержня с пропорциональными координатами границ $y_1(x), \dots, y_s(x)$ показано распределение эквипотенциальных энергетических уровней в виде графиков — продольных сечений ЭПП. В каждом слое для примера

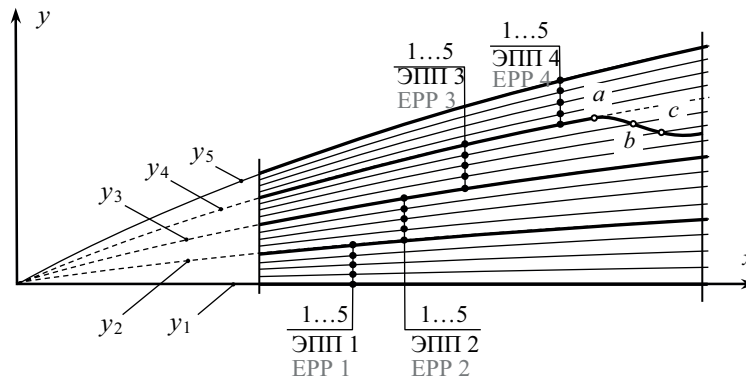


Рис. 2. Продольные сечения эквипотенциальных поверхностей $W_k(\zeta) = \text{const}$ в четырехслойном стержне: a, b, c — точки разрыва энергетических уровней

Fig. 2. Longitudinal cross-sections of equipotential surfaces $W_k(\zeta) = \text{const}$ in a four-layer rod: a, b, c — energy level discontinuity points

отмечены по пять энергетических уровней, обозначенных точками 1–5. В случае несоблюдения условий пропорциональности координат границ в некотором слое (или на его локальном фрагменте — a, b, c на границе y_4) данные ЭПП пересекают границу слоя и становятся разрывными в силу изменения модуля упругости. На таких участках границ градиент удельной энергии $\partial W/\partial y_j \neq 0$ и они не являются ЭПП.

На рис. 3, a представлен график изменения удельной энергии $W_k(\zeta)$ (15) в поперечном направлении, имеющий разрывы на границах слоев.

Таким образом, найденное оптимальное профилирование двух слоев $b_j(x)$ создает в слоистой структуре напряженно-деформированное состояние с потенциальным полем деформаций, в котором поверхности равной удельной энергии деформации геометрически подобны поверхностям раздела слоев. Это обеспечивает выравнивание энергии на границах слоев. Нарушение условий пропорциональности (подобия) границ слоев приводит к разрывности энергетических поверхностей и, как следствие, недогруженности одних и перегруженности других областей слоистой структуры.

Из условия (15) также следует и условие выравнивания напряжений на ЭПП в j -м слое:

$$\sigma_{x,j}(\zeta) = \pm \sqrt{2E_j W_j(\zeta)} = \text{const}. \quad (16)$$

При $\zeta = 1$ достигается максимум энергии деформации (15) и напряжения (16), связанных зависимостью $W_{j,\text{max}} = \sigma_{x,\text{max}}^2 / 2E_j$. Очевидно, что принятие для напряжения предельной величины R_j^\pm — расчетного сопротивления и соответствующего ему значения энергии $W_{j,\text{adm}} = R_j^2 / 2E_j$, доставляет минимум стоимости материалов (8). Это обстоятельство отражает эквивалентность постановки вариационной задачи о минимуме энергии деформации структурно-неоднородной системы (7) при условии постоянства стоимости материалов (8) с оптимизационной задачей, сформулированной на основе критерия минимума стоимости материалов системы. Данный факт для однородных систем применительно к их объему отмечался в ряде работ [2, 26, 27].

Если ввести величину допустимой удельной энергии деформации $W_{k,\text{adm}}$ ($k = 1, \dots, s$) для каждого материала, примененного в слоистом стержне,

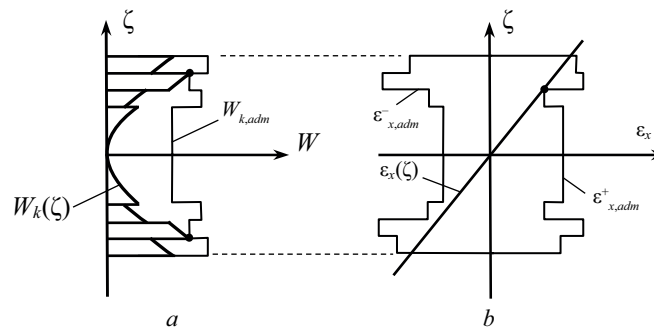


Рис. 3. Графики удельной энергии $W_k(\zeta)$ (15) (a) и деформаций $\epsilon_x(y)$ (b) в слоистом стержне; $W_{k,\text{adm}}, \epsilon_{x,\text{adm}}^+, \epsilon_{x,\text{adm}}^-$ — предельные величины энергии и деформации при растяжении и сжатии

Fig. 3. Graphs of specific energy $W_k(\zeta)$ (15) (a) and deformations $\epsilon_x(y)$ (b) in a layered rod; $W_{k,\text{adm}}, \epsilon_{x,\text{adm}}^+, \epsilon_{x,\text{adm}}^-$ — ultimate values of energy and deformation under tension and compression

то условие энергетической допустимости его состояния может быть записано в виде:

$$\max(W_k(\zeta)) \leq W_{k,adm}. \quad (17)$$

Схема применения критерия (17) проиллюстрирована на рис. 3, а. В предельном состоянии должно выполняться внутреннее касание линии $W_k(\zeta)$ и полигона предельных энергий деформаций материалов $W_{k,adm}$. В соответствии с числом точек касания критерий может быть многоточечным (n -кратным). С увеличением n эффективность слоистой структуры повышается.

Аналогичные построения могут быть выполнены и для напряжений $\sigma_{x,k}(\zeta)$ и их предельных значений (расчетных сопротивлений $\pm R_k^\pm(\zeta)$). В силу разрывности функции напряжений на границах слоев в трудах [24, 28] была обоснована запись критерия прочности через деформации. Опуская здесь коэффициенты учета двухосности напряженного состояния и запаса прочности, запишем его в следующем виде:

$$-\varepsilon_{x,adm}^- \leq \varepsilon_x(\zeta) \leq \varepsilon_{x,adm}^+ \quad (18)$$

Графически это иллюстрируется на рис. 3, б вписыванием прямой линии $\varepsilon_x(\zeta)$ в полигон предельных деформаций $\varepsilon_x^\pm(\zeta)$ с осуществлением внутреннего касания в двух точках. Их положение определяется свойствами материалов слоистого стержня и не зависит от номера слоя, содержащего варьируемую функцию. При рассмотрении всевозможных деформированных состояний, отличающихся знаками предельных деформаций в точках касания, могут быть реализованы четыре типа предельных состояний.

Осевое растяжение (сжатие)

Рассматривая стержень с симметричным расположением слоев при действии продольной силы $N(x)$, получим вышерассмотренные зависимости в виде:

$$D_A = 2(D_{A_0} + E_j b_j h_j); \quad \sigma_{x,k} = E_k \frac{N}{D_A};$$

$$W = \int \frac{N^2}{2D_A} dx; \quad L = \frac{N^2}{2D_A} + \lambda_1 c_j \gamma_j b_j h_j$$

и уравнение Эйлера:

$$\frac{N^2}{2D_A^2} E_j = \lambda_1 c_j \gamma_j,$$

которое при учете формулы (2) для напряжения $\sigma_{x,k}^{(N)}$ дает условия:

$$W_k = \frac{\sigma_{x,k}^2}{2E_k} = \lambda_1 c_j \gamma_j \frac{E_k}{E_j} = \text{const.}$$

В оптимальной неоднородной структуре, испытывающей растяжение (сжатие), происходит формирование эквипотенциальных областей (слоев в целом). Значение удельной энергии в них определяется величиной предельной энергии $W_{adm,k}$ — наиболее нагруженного (деформированного) слоя.

Предельные величины энергии, напряжения (расчетного сопротивления R_k) и деформации $\varepsilon_{adm,k}$ связаны зависимостями:

$$W_{k,adm} = \frac{R_k^2}{2E_k} = \frac{1}{2} \varepsilon_{x,adm}^2 E_k. \quad (19)$$

С учетом этого искомая варьируемая ширина слоя находится как:

$$b_j(x) = \frac{1}{2E_j h_j} \left(\frac{NE_k}{\pm R_k^\pm} - 2D_{A_0} \right). \quad (20)$$

Очевидно, что в данной задаче аналогично может быть найдена высота слоя $h_j(x)$ или площадь его сечения $A_j(x)$.

Изгиб с растяжением стержня с несимметричным сечением

Пусть при произвольных заданных функциях усилий $M(x), N(x)$ требуется определить высоту $h_1(x)$ и $h_s(x)$ наружных слоев в s -слоynom стержне (рис. 1, д). Будем считать, что из множества координат границ слоев:

$$y_1, y_2, \dots, y_s, y_{s+1}$$

внутренние, произвольно заданные, границы привязаны к отсчетной плоскости x_0z , а координаты двух наружных границ:

$$y_1 = y_2 - h_1; \quad y_{s+1} = y_s + h_s$$

являются искомыми варьируемыми функциями.

Сформируем выражения жесткостных характеристик (4):

$$\begin{aligned} D_A &= E_1 b_1 (y_2 - y_1) + D_{A_0} + E_s b_s (y_{s+1} - y_s); \\ D_S &= E_1 b_1 \frac{y_2^2 - y_1^2}{2} + D_{S_0} + E_s b_s \frac{y_{s+1}^2 - y_s^2}{2}; \\ D_I &= E_1 b_1 \frac{y_2^3 - y_1^3}{3} + D_{I_0} + E_s b_s \frac{y_{s+1}^3 - y_s^3}{3}, \end{aligned} \quad (21)$$

напряжений (2) и ограничений (8) на стоимость материалов варьируемых слоев. Запишем лагранжиан задачи (9):

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2D} [M^2 D_A + 2MND_S + N^2 D_I] + \\ &+ \lambda_1 [c_1 \gamma_1 b_1 (y_2 - y_1) + c_s \gamma_s b_s (y_{s+1} - y_s)]. \end{aligned}$$

Его варьирование по y_1 и y_{s+1} дает уравнения:

$$\left\{ \begin{aligned} &\frac{M^2}{2D^2} (D_A y_1 - D_S)^2 - \\ &- \frac{MN}{D^2} (D_A y_1 - D_S)(D_I - D_S y_1) + \\ &+ \frac{N^2}{2D^2} (D_I - D_S y_1)^2 = \lambda_1 \frac{c_1 \gamma_1}{E_1}; \\ &\frac{M^2}{2D^2} (D_A y_{s+1} - D_S)^2 - \\ &- \frac{MN}{D^2} (D_A y_{s+1} - D_S)(D_I - D_S y_{s+1}) + \\ &+ \frac{N^2}{2D^2} (D_I - D_S y_{s+1})^2 = \lambda_1 \frac{c_s \gamma_s}{E_s}. \end{aligned} \right.$$

С учетом формул для компонент напряжений (2) они могут быть представлены в виде:

$$\frac{1}{2E_1} [\sigma_{x,1}^{(M)}(y_1) + \sigma_{x,1}^{(N)}(y_1)]^2 = \lambda_1 \frac{c_1 \gamma_1}{E_1} = \text{const};$$

$$\frac{1}{2E_s} [\sigma_{x,s}^{(M)}(y_s) + \sigma_{x,s}^{(N)}(y_s)]^2 = \lambda_1 \frac{c_s \gamma_s}{E_s} = \text{const}, \quad (22)$$

что является условием выравнивания удельной энергии деформации на двух наружных поверхностях $y = y_1(x), y = y_{s+1}(x)$ — ЭПП в оптимальной системе:

$$W_1(x, y_1) = \text{const};$$

$$W_s(x, y_{s+1}) = \text{const}.$$

Отсюда следуют условия постоянства напряжений на наружных границах варьируемых слоев и эквивалентность с задачей, поставленной по критерию минимума стоимости материалов. Вписывание линии предельного распределения деформаций $\varepsilon_x(y)$ в полигон предельных деформаций s -слойной структуры дает четыре возможных предельных состояния. Их реализация в зависимости от функций усилий M, N происходит на определенных участках слоистого стержня. Искомые геометрические функции $h_1(x), h_s(x)$ определяются из условий прочности, записанных с использованием характеристик (21).

Поперечный сдвиг в слоистом стержне

Рассмотрим варьирование ширины $b_j(x)$ некоторого внутреннего слоя при действии в сечении поперечной силы. Покажем, что наряду с точными (в рамках принятых гипотез) формулами для напряжений могут использоваться и приближенные зависимости. В связи с этим поперечное касательное напряжение и характеристику поперечной жесткости будем определять на основе соотношений (5), (6).

Сформировав функционал энергии деформации (7) с ограничением стоимости (8), запишем лагранжиан:

$$L = \frac{Q^2}{2D_Q} + \lambda_1 c_j \gamma_j b_j h_j.$$

Проварьировав его по переменной b_j после преобразований, получим:

$$\frac{Q^2}{2F_\tau^2 b_j^2 G_j} \int_{h_j} f_\tau^2 dy = \lambda_1 c_j \gamma_j b_j h_j.$$

Учитывая формулу для напряжения (5), получим:

$$W_\tau(y) = \frac{\tau_j^2}{2G_j} = \lambda_1 c_j \gamma_j \frac{h_j f_\tau^2(y)}{\int_{h_j} f_\tau^2 dy}. \quad (23)$$

При введении условия пропорциональности границ (13) на поверхностях с относительной координатой $\zeta = y/y_{j+1} = \text{const}$ выражение (23) дает постоянное значение удельной энергии деформации при сдвиге, отражая факт реализации ЭПП. Наибольшее значение энергии наблюдается в уровне $y = 0$, а минимальное $W_\tau = 0$ на наружных поверхностях стержня при отсутствии на них тангенциальных сил. Использование для касательных напряжений формулы (3) позволяет уточнить положение ЭПП в слоистых стержнях с несимметричной структурой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рассмотренных задачах изгиба, растяжения, поперечного сдвига и совместного изгиба с растяжением слоистых стержней показано совпадение результатов вариационной оптимизации и оптимизации по критерию минимума стоимости материалов. Вариационная постановка с одним изопериметрическим ограничением на суммарную стоимость материалов — необходимым по смыслу задачи — дает *глобальный минимум* функционала энергии деформации и стоимости материалов системы и отражает так называемый идеальный (эталонный) проект. Расширение набора ограничений, отражающих требования норм проектирования (например, по перемещениям), будет неизбежно приводить к удорожанию проекта, что является естественным и объяснимым. Тем не менее знание эталонного проекта с минимальным расходом материалов и энергии деформации ценно и полезно с практической точки зрения [1, 7, 14].

В оптимальной системе варьирование геометрических параметров некоторых составных частей системы (слоев) приводит к формированию в них и за их пределами поверхностей (областей) с одинаковым значением удельной энергии деформации. Форма и расположение эквипотенциальных поверхностей определяется действующими усилиями и структурой системы.

Из интегрального вариационного критерия минимума энергии деформации вытекают практические критерии выравнивания удельной энергии деформации, а также основного напряжения либо деформации на поверхности областей с варьируемыми размерами. В составных неоднородных структурах рекомендуется, как более удобный, критерий выравнивания деформаций. Данные критерии носят уже не интегральный, а локальный характер, что упрощает их практическое использование.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Перельмутер А.В.* Задачи синтеза в теории сооружений (краткий исторический обзор) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 2 (55). С. 70–106. EDN VSTVRX.

2. *Юрьев А.Г., Панченко Л.А.* Энергетическое начало в теории синтеза конструкций // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 35–41. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-35-41. EDN SGKZNN.

3. *Yankovskii A.P.* Refined Modeling of Flexural Deformation of Layered Plates with a Regular Structure Made from Nonlinear Hereditary Materials // *Mechanics of Composite Materials*. 2018. Vol. 53. Issue 6. Pp. 705–724. DOI: 10.1007/s11029-018-9697-9. EDN XXUTAL.
4. *Yankovskii A.P.* Critical Analysis of the Equations of Statics in the Bending Theories of Composite Plates Obtained on the Basis of Variational Principles of Elasticity Theory 1. General Theories of High Order // *Mechanics of Composite Materials*. 2020. Vol. 56. Issue 3. Pp. 271–290. DOI: 10.1007/s11029-020-09880-8. EDN ASGJMZ.
5. *Троицкий В.А., Петухов Л.В.* Оптимизация формы упругих тел. М. : Наука, 1982. 432 с.
6. *Юрьев А.Г.* Вариационные постановки задач структурного синтеза в статике сооружений. М. : МИСИ, 1987. 94 с.
7. *Ляхович Л.С., Перельмутер А.В.* Некоторые вопросы оптимального проектирования строительных конструкций // *Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций*. 2014. Т. 10. № 2. С. 14–23. EDN SXCOQB.
8. *Васильков Г.В.* Эволюционные задачи строительной механики. Синергетическая парадигма. Ростов н/Д. : ИнфоСервис, 2003. EDN QNKGAT.
9. *Гольдштейн Ю.Б., Соломец М.А.* Вариационные задачи статики оптимальных стержневых систем. Л. : Изд-во ЛГУ, 1980. 208 с.
10. *Мищенко А.В., Вешкин М.С.* Применение критерия минимума энергии деформации в задачах рационального профилирования неоднородных стержней // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2025. № 5 (797). С. 15–29. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-797-5-15-29. EDN TCEUPL.
11. *Юрьев А.Г., Нужный С.Н.* Оптимизация топологии однопролетных одноэтажных рам // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 10–4. С. 742–746. EDN RCHQFH.
12. *Ebrahimi M., Fakoor M.* Design-oriented fracture criteria for orthotropic composites based on minimum strain energy density theory // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2025. Vol. 140. P. 105182. DOI: 10.1016/j.tafmec.2025.105182. EDN EHENYRE.
13. *Beck R., da Silva Ja.A.P., da Silva L.Fm., Tita V., de Medeiros R.* Assessing critical fracture energy in mode I for bonded composite joints: A numerical–experimental approach with uncertainty analysis // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2024. DOI: 10.1177/14644207241229601. EDN QPBVWG.
14. *Ляхович Л.С.* Особые свойства оптимальных систем и основные направления их реализации в методах расчета сооружений. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2009. 371 с. EDN QNOOHF.
15. *Wenzel C., Vidal P., D’Ottavio M., Polit O.* Coupling of heterogeneous kinematics and Finite Element approximations applied to composite beam structures // *Composite Structures*. 2014. Vol. 116. Pp. 177–192. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.04.022
16. *Biscani F., Giunta G., Belouettar S., Carrera E., Hu H.* Variable kinematic beam elements coupled via Arlequin method // *Composite Structures*. 2011. Vol. 93. Issue 2. Pp. 697–708. DOI: 10.1016/j.compstruct.2010.08.009. EDN OEMSBZ.
17. *Vidal P., Polit O.* A family of sinus finite elements for the analysis of rectangular laminated beams // *Composite Structures*. 2008. Vol. 84. Issue 1. Pp. 56–72. DOI: 10.1016/j.compstruct.2007.06.009. EDN KUKZVN.
18. *Liu S., Soldatos K.P.* On the prediction improvement of transverse stress distributions in cross-ply laminated beams: advanced versus conventional beam modelling // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2002. Vol. 44. Issue 2. Pp. 287–304. DOI: 10.1016/S0020-7403(01)00098-4
19. *Matsunaga H.* Interlaminar stress analysis of laminated composite beams according to global higher-order deformation theories // *Composite Structures*. 2002. Vol. 55. Issue 1. Pp. 105–114. DOI: 10.1016/S0263-8223(01)00134-9
20. *Tahani M.* Analysis of laminated composite beams using layerwise displacement theories // *Composite Structures*. 2007. Vol. 79. Issue 4. Pp. 535–547. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.02.019. EDN KULD MX.
21. *Gorynin A.G., Gorynin G.L., Golushko S.K.* Mathematical Modeling of Three-dimensional Stress-strain State of Homogeneous and Composite Cylindrical Axisymmetric Shells // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics*. 2024. Vol. 17. Issue 1. Pp. 27–37. EDN IRZWVG.
22. *Hu H., Belouettar S., Potier-Ferry M., Daya E.M., Makradi A.* Multi-scale nonlinear modelling of sandwich structures using the Arlequin method // *Composite Structures*. 2010. Vol. 92. Issue 2. Pp. 515–522. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.08.051
23. *Atashipour S.R., Challamel N., Girhammar U.A., Folkow P.D.* Flexible N-layer composite beam/column elements with interlayer partial interaction imperfection — a novel approach to structural stability and dynamic analyses // *Composite Structures*. 2025. Vol. 367. P. 119219. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119219. EDN HBOLFG.
24. *Мищенко А.В.* Методы расчета и рационального проектирования структурно неоднородных стержней. Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2025. 146 с. EDN AWFVQL.
25. *Мищенко А.В.* Напряженное состояние структурно-неоднородных стержней из разномодульных материалов при термосиловом воздействии //

Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 4. С. 43–52. EDN WCEXDF.

26. *Wasiutynski Z.* On the congruency of the forming according to the minimum potential energy with that according to the equal strength // *Bull. Acad. Pol. Sci. Tech.* 1960. Vol. 8. Issue 6. Pp. 259–268.

27. *Мищенко А.В., Кучеренко И.В.* О соответствии общефизических и технико-экономических

критериев оптимизации механических систем // *Инновационные технологии укрепления грунтовых массивов на транспортных коммуникациях в сложных геологических условиях* : мат. Всеросс. науч.-практ. конф. 2025. С. 183–191. EDN ZDLFSL.

28. *Немировский Ю.В.* Равнопрочные слоистые упругие арки и балки // *Известия высших учебных заведений. Строительство.* 1996. № 8. С. 20–25. EDN XPVISD.

Поступила в редакцию 17 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 27 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

О Б АВТОРАХ: **Андрей Викторович Мищенко** — доктор технических наук, доцент, профессор, кафедра строительной механики; **Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)**; 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113; заведующий кафедрой общепрофессиональных дисциплин; **Новосибирское высшее военное командное ордена Жукова училище**; 630117, г. Новосибирск, ул. Иванова, д. 49; РИНЦ ID: 123809, Scopus: 56996260100, ResearcherID: AAA-8081-2022, ORCID: 0000-0002-3540-7631; mishchenko.av59@yandex.ru;

Максим Сергеевич Вешкин — кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики; **Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)**; 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113; РИНЦ ID: 819363, Scopus: 57200289320, ResearcherID: КАМ-2991-2024, ORCID: 0009-0007-6775-8392; m.veshkin@sibstrin.ru.

Вклад авторов:

Мищенко А.В. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, итоговые выводы.

Вешкин М.С. — работа с текстом, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Perel'muter A.V. Synthesis problems in the theory of structures (brief historical review). *Journal of Construction and Architecture.* 2016; 2(55):70-106. EDN VSTVRX. (rus.).

2. Yuriev A., Panchenko L. Energy beginning in the theory of structure synthesis. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.* 2023; 10:35-41. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-35-41. EDN SGKZNZ. (rus.).

3. Yankovskii A.P. Refined Modeling of Flexural Deformation of Layered Plates with a Regular Structure Made from Nonlinear Hereditary Materials. *Mechanics of Composite Materials.* 2018; 53(6):705-724. DOI: 10.1007/s11029-018-9697-9. EDN XXUTAL.

4. Yankovskii A.P. Critical Analysis of the Equations of Statics in the Bending Theories of Composite Plates Obtained on the Basis of Variational Principles of Elasticity Theory I. General Theories of High Order. *Mechanics of Composite Materials.* 2020; 56(3):271-290. DOI: 10.1007/s11029-020-09880-8. EDN ASGJMZ.

5. Troitsky V.A., Petukhov L.V. *Optimization of the shape of elastic bodies.* Moscow, Nauka, 1982; 432. (rus.).

6. Yuryev A.G. *Variational statements of problems of structural synthesis in the statics of structures.* Moscow, MISI, 1987; 94. (rus.).

7. Lyakhovich L.S., Perel'muter A.V. Some problems of building constructions optimal projecting. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.* 2014; 10(2):14-23. EDN SXCOQB. (rus.).

8. Vasilkov G.V. Evolutionary tasks of structural mechanics. *Synergetic paradigm.* Rostov-on-Don, Info-Service, 2003. EDN QNKGAT. (rus.).

9. Goldstein Yu.B., Solomeshch M.A. *Variational problems of statics of optimal rod systems.* Leningrad, Leningrad State University Publishing House, 1980; 208. (rus.).

10. Mishchenko A.V., Veshkin M.S. Application of the criterion of minimum deformation energy in problems of rational profiling of heterogeneous rods. *News of higher educational institutions. Construction.* 2025; 5(797):15-29. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-797-5-15-29. EDN TCEUPL. (rus.).

11. Yuriev A.G., Nuzhnyi S.N. Topology optimization of one-spanned one-storeyed frames. *Fundamental Research.* 2013; 10-4:742-746. EDN RCHQFH. (rus.).

12. Ebrahimi M., Fakoor M. Design-oriented fracture criteria for orthotropic composites based on minimum strain energy density theory. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2025; 140:105182. DOI: 10.1016/j.tafmec.2025.105182. EDN EHNRYE.
13. Beck R., da Silva Ja.A.P., da Silva L.Fm., Tita V., de Medeiros R. Assessing critical fracture energy in mode I for bonded composite joints: A numerical–experimental approach with uncertainty analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2024. DOI: 10.1177/14644207241229601. EDN QPBVWG.
14. Lyakhovich L.S. *Special properties of optimal systems and the main directions of their implementation in the methods of calculating structures*. Tomsk, TSUACE Publishing House, 2009; 371. EDN QNOOHF. (rus.).
15. Wenzel C., Vidal P., D’Ottavio M., Polit O. Coupling of heterogeneous kinematics and Finite Element approximations applied to composite beam structures. *Composite Structures*. 2014; 116:177-192. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.04.022
16. Biscani F., Giunta G., Belouettar S., Carrera E., Hu H. Variable kinematic beam elements coupled via Arlequin method. *Composite Structures*. 2011; 93(2):697-708. DOI: 10.1016/j.compstruct.2010.08.009. EDN OEMSBZ.
17. Vidal P., Polit O. A family of sinus finite elements for the analysis of rectangular laminated beams. *Composite Structures*. 2008; 84(1):56-72. DOI: 10.1016/j.compstruct.2007.06.009. EDN KUKZVN.
18. Liu S., Soldatos K.P. On the prediction improvement of transverse stress distributions in cross-ply laminated beams: advanced versus conventional beam modelling. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2002; 44(2):287-304. DOI: 10.1016/S0020-7403(01)00098-4
19. Matsunaga H. Interlaminar stress analysis of laminated composite beams according to global higher-order deformation theories. *Composite Structures*. 2002; 55(1):105-114. DOI: 10.1016/S0263-8223(01)00134-9
20. Tahani M. Analysis of laminated composite beams using layerwise displacement theories. *Composite Structures*. 2007; 79(4):535-547. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.02.019. EDN KULDMMX.
21. Gorynin A.G., Gorynin G.L., Golushko S.K. Mathematical Modeling of Three-dimensional Stress-strain State of Homogeneous and Composite Cylindrical Axisymmetric Shells. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics*. 2024; 17(1):27-37. EDN IRZWVG.
22. Hu H., Belouettar S., Potier-Ferry M., Daya E.M., Makrati A. Multi-scale nonlinear modelling of sandwich structures using the Arlequin method. *Composite Structures*. 2010; 92(2):515-522. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.08.051
23. Atashipour S.R., Challamel N., Girhammar U.A., Folkow P.D. Flexible N-layer composite beam/column elements with interlayer partial interaction imperfection — A novel approach to structural stability and dynamic analyses. *Composite Structures*. 2025; 367:119219. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.119219. EDN HBOLFG.
24. Mishchenko A.V. *Methods of calculation and rational design of structurally heterogeneous rods*. Novosibirsk, NGASU (Sibstrin), 2025; 146. EDN AWFVQL. (rus.).
25. Mishchenko A.V. Stressstate of structurally not uniform rods made from different module materials under thermo-force influences. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2016; 4:43-52. EDN WCEXDF. (rus.).
26. Wasiutynski Z. On the congruency of the forming according to the minimum potential energy with that according to the equal strength. *Bull. Acad. Pol. Sci. Tech.* 1960; 8(6):259-268.
27. Mishchenko A.V., Kucherenko I.V. On the conformity of general physical and technical-economic criteria of optimization of mechanical systems. *Innovative technologies for strengthening soil massifs on transport communications in complex geological conditions: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference*. 2025; 183-191. EDN ZDLFSL. (rus.).
28. Nemirovsky Yu.V. Equal-strength layered elastic arches and beams. *News of higher educational institutions. Construction*. 1996; 8:20-25. EDN XPVISD. (rus.).

Received December 17, 2025.

Adopted in revised form on December 27, 2025.

Approved for publication on January 29, 2026.

B I O N O T E S: **Andrey V. Mishchenko** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Structural Mechanics; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; Head of the Department of General Professional Disciplines; **Novosibirsk Higher Military Command Order of Zhukov School**; 49 Ivanova st., Novosibirsk, 630117, Russian Federation; ID RSCI: 123809, Scopus: 56996260100, ResearcherID: AAA-8081-2022, ORCID: 0000-0002-3540-7631; mishchenko.av59@yandex.ru;

Maxim S. Veshkin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural Mechanics; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; ID RSCI: 819363, Scopus: 57200289320, ResearcherID: KAM-2991-2024, ORCID: 0009-0007-6775-8392; m.veshkin@sibstrin.ru.

Author contributions:

Andrey V. Mishchenko — scientific supervision, study concept, methodology development, and final conclusions.

Maxim S. Veshkin — text editing and final conclusions.

The authors declare no conflicts of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 666.982.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.725-741

Параметры сейсмостойкости железобетонных каркасных зданий после пожара с учетом многовариантности огневого воздействия

Ашот Георгиевич Тамразян, Владимир Игоревич Черник

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Последствия разрушительных землетрясений показывают, что проблема сейсмостойкости железобетонных каркасов после пожара актуальна. Применяемые при решении подобного класса задач расчетные модели должны учитывать нелинейные характеристики бетона и арматуры, вариативность огневого воздействия и расчетных акселерограмм. Исследование направлено на поиск наиболее опасных (с точки зрения сейсмостойкости) вариантов воздействия пожара на железобетонные каркасные здания.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования выбрана плоская железобетонная пятиэтажная рама при различных вариантах огневого воздействия. Воздействию пожара принято по стандартной температурной кривой (ISO 834) продолжительностью 120 мин. Рассмотрены пять вариантов: контрольная рама; пожар в крайнем пролете на первом этаже; то же на третьем этаже; пожар во всех пролетах на первом этаже; то же на третьем этаже. Предварительно проведен теплотехнический анализ в ПК SolidWorks с определением температурных полей в сечениях элементов. Выполнен сейсмический расчет пяти рам в нелинейной постановке в ПК OpenSees. Расчет производится во временной области на акселерограмму Лома-Приета (1989). Используются билинейные и трехлинейные диаграммы материалов. Сечения моделируются с помощью волоконистой модели.

Результаты. Осуществлена численная оценка зависимости параметров сейсмостойкости железобетонных каркасов от различных вариантов огневого воздействия. Периоды первого тона собственных колебаний увеличились по отношению к контрольной раме (неповрежденной пожаром) до 11,2 %, перемещения в уровне покрытия возросли до 32,2 %, максимальные значения междуэтажных сдвигов возросли до 34,0 %, из-за перераспределения усилий максимальные значения изгибающих моментов в элементах рамы увеличились до 26,3 %. Изменяются схемы разрушения, отмечается образование пластических шарниров не только в ригелях, но и в колоннах, для большинства рассмотренных рам уровень деформаций в элементах достигает критического.

Выводы. Выявлено, что самым опасным сценарием, в наибольшей степени снижающим сейсмостойкость железобетонного каркаса, является возникновение пожара на первом этаже. Важным оказывается и процент поврежденных вертикальных несущих элементов — при большем проценте сейсмостойкость снижается существеннее. В отдельных случаях, например при локальном повреждении пожаром средних этажей, сейсмостойкость каркаса снижается незначительно. На стадии проектирования здания, находящегося в сейсмоопасном районе, рекомендуется учитывать наиболее опасные варианты возникновения огневого воздействия. При этом следует в большей степени повышать огнестойкость вертикальных несущих конструкций нижних этажей и сокращать размеры пожарных отсеков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетон, землетрясение, нелинейность, огнестойкость, пластический шарнир, пожар, сейсмостойкость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тамразян А.Г., Черник В.И. Параметры сейсмостойкости железобетонных каркасных зданий после пожара с учетом многовариантности огневого воздействия // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 725–741. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.725-741

Автор, ответственный за переписку: Ашот Георгиевич Тамразян, tamrazian@mail.ru.

Seismic resistance parameters of reinforced concrete frame buildings after fire considering multiple fire exposure scenarios

Ashot G. Tamrazyan, Vladimir I. Chernik

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

ABSTRACT

Introduction. The consequences of devastating earthquakes demonstrate that the issue of seismic resistance of reinforced concrete frames after fire is highly relevant. The computational models used to address such problems must account for

the nonlinear characteristics of concrete and reinforcement, variability of fire exposure, and design accelerograms. This study aims to identify the most hazardous fire exposure scenarios (from the standpoint of seismic resistance).

Materials and methods. A flat five-story reinforced concrete frame was selected as the research object under various fire exposure scenarios. Fire exposure was applied according to the standard temperature-time curve (ISO 834) with a duration of 120 minutes. Five scenarios were considered. A preliminary thermal analysis was conducted in PC SolidWorks to determine temperature fields in element cross-sections. Subsequently, nonlinear seismic analysis of the five frames was performed in PC OpenSees. The analysis was carried out in the time domain using the Loma Prieta (1989) accelerogram. Bilinear and trilinear material diagrams were used. Cross-sections were modelled using a fiber model.

Results. A FEM was conducted of the dependence of seismic resistance parameters of reinforced concrete frames on various fire exposure scenarios. The periods of the first mode increased by up to 11.2 % compared to the control frame, roof-level displacements increased by up to 32.2 %, maximum inter-story drifts increased by up to 34.0 %, and maximum bending moments in frame elements increased by up to 26.3 % due to force redistribution. Failure mechanisms changed — plastic hinges formed not only in beams but also in columns; for most frames considered, deformation levels in elements reached critical values.

Conclusions. The most dangerous scenario, which most significantly reduces the seismic resistance of the reinforced concrete frame, is the occurrence of fire on the first floor. The percentage of damaged vertical load-bearing elements is particularly significant here — higher percentages lead to a more substantial reduction in seismic resistance. In some cases, such as localized fire damage on intermediate floors, the frame's seismic resistance decreases only slightly. During the design stage of buildings in seismic zones, it is recommended to consider the most hazardous fire exposure scenarios. Special emphasis should be placed on enhancing the fire resistance of vertical load-bearing structures in lower floors and reducing the size of fire compartments.

KEYWORDS: reinforced concrete, earthquake, nonlinearity, fire resistance, plastic hinge, fire, earthquake resistance

FOR CITATION: Tamrazyan A.G., Chernik V.I. Seismic resistance parameters of reinforced concrete frame buildings after fire considering multiple fire exposure scenarios. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):725-741. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.725-741 (rus.).

Corresponding author: Ashot G. Tamrazyan, tamrazian@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие методик расчета зданий и сооружений позволяет учитывать комплекс нагрузок и воздействий при разработке оптимальных проектных решений, обеспечивающих безопасность жизни людей и материального имущества. Современные исследования подчеркивают критическую роль учета комбинаций экстремальных воздействий при обеспечении надежности железобетонных конструктивных систем [1]. К таким комбинациям можно отнести сочетание сейсмических нагрузок и пожара. Последствия пожаров в зданиях включают значительное ухудшение динамических характеристик конструкций, изменение механизмов разрушения и снижение общей несущей способности [2].

Статистика пожаров на территории Российской Федерации за 2021 г. [3] показывает, что в ряде регионов, находящихся в зонах с высокой сейсмической активностью, происходит наибольшее количество пожаров по стране (Камчатский, Приморский, Хабаровский край; Сахалинская, Амурская, Курганская области и др.). В этих регионах фиксируется от 400 до 1000 пожаров в расчете на 100 тыс. чел.

Выделяются два основных варианта последовательного действия огневых и сейсмических воздействий:

1. В здании первоначально происходит возгорание. Полный комплекс мероприятий по усилению конструкций может занимать продолжительное время — от года и более. В этот период может возникнуть землетрясение (не обязательно максимальное расчетное землетрясение), которое будет воздействовать на поврежденное здание.

2. Более вероятным является второй сценарий: после первых толчков землетрясения (главного толчка или форшока) резко возрастает риск возникновения и распространения пожара из-за разрушения спринклерных систем пожаротушения, обрыва коммуникаций, ограниченного доступа пожарных к месту возгорания и иных сопутствующих факторов [4]. После основного толчка могут появиться дополнительные (афтершоки), которые будут воздействовать после или одновременно с пожаром.

Существуют работы [5], обосновывающие возможность применения линейно-спектрального метода при определении сейсмостойкости железобетонных зданий после пожара. Спектральный метод положен в основу норм проектирования России и большинства зарубежных стран. Однако этот подход может быть использован для достаточно простых систем и вариантов огневого воздействия.

Для учета истинного характера работы конструкции в условиях комбинаций особых воздействий наиболее достоверным инструментом служит нелинейный динамический метод анализа [6]. Проведение нелинейных расчетов невозможно без установления ключевых характеристик системы, соответствующих данной методике расчета, которые используются как исходные сведения и считаются известными. Эти исходные характеристики обычно устанавливаются экспериментально, в том числе и на основе численного моделирования. В случае воздействия сейсмической нагрузки после пожара важно знать параметры, определяющие диаграмму деформирования в случае динамического малоциклового нагружения и диссипативные свойства системы [7].

Указанные параметры используются для составления уравнений движения системы в форме метода перемещений:

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = -M\ddot{Y}_o, \quad (1)$$

где M — матрица масс:

$$M = \begin{pmatrix} m_1 & & & \\ & m_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & m_n \end{pmatrix}, \quad (2)$$

m_i — масса i -го узла;

C — матрица параметров демпфирования:

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nn} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

c_{ij} — параметр демпфирования, равный реакции, приложенной к i -му узлу при движении j -го узла с единичной скоростью;

K — матрица жесткости:

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

k_{ij} — жесткость, равная реакции мнимой связи в i -м узле при единичном смещении j -го узла;

\bar{Y} , $\dot{\bar{Y}}$, $\ddot{\bar{Y}}$ — векторы перемещений, скоростей и ускорений вдоль оси OY ;

\ddot{Y}_o — ускорение в уровне основания.

Закон движения основания задается в виде акселерограммы землетрясения — зависимости ускорения грунта от времени [8].

Для решения системы уравнений (1) применяются прямые методы интегрирования динамических уравнений — метод центральных разностей и метод конечных элементов (МКЭ). Основным ограничением первого является фиксированный временной шаг, поэтому в практике предпочтение отдается МКЭ [9]. Временной интервал дискретизируется на малые участки, где перемещения аппроксимируются интегрируемыми полиномиальными функциями. Ускорения на шаге считаются постоянными (метод Ньюмарка).

При нагружении железобетонного каркаса сейсмическими силами после высокотемпературного воздействия возможен преждевременный отказ конструктивных элементов с последующим обрушением здания. Причина этого заключается в снижении прочностных характеристик арматуры и бетона при нагреве [10]. Зависимости между температурой нагрева и механическими характеристиками материалов на сегодняшний момент достаточно подробно изучены [11] и отражены в нормах проектирования.

Для изучения влияния пожара на сейсмический отклик железобетонных рам коллективами исследователей выполнялись экспериментальные и численные испытания на моделях.

В работе [12] приведен расчет 12-этажного железобетонного каркасного здания, подверженного совместно действию пожара и сейсмике интенсивностью 9 баллов. Рассмотрен частный случай огневого воздействия. Численный расчет выявил существенные изменения напряженно-деформированного состояния каркаса. Горизонтальные перемещения возросли в 1,65 раза.

В исследовании [13] была проведена оценка сейсмостойкости шестизэтажного железобетонного здания через 6 дней после четырехчасового пожара в центральном отсеке первого этажа. Сейсмостойкость колонн существенно снизилась: жесткость при поперечной нагрузке уменьшилась на 31 %; осевая жесткость упала на 70 %; максимальное боковое перемещение при разрушении сократилось на 50 %. Эти результаты говорят о хрупком механизме разрушения колонн после пожара. Смещение в уровне покрытия достигло 217 мм, что подчеркивает общее снижение жесткости каркаса.

Авторы статьи [14] сосредоточились на проблеме сейсмоусиления зданий, которые ранее подвергались огневому воздействию в результате неисправностей инженерных сетей. Было выявлено, что остаточные свойства железобетонных конструкций зависят от длительности нагрева и охлаждения. В качестве примера рассмотрена трехэтажная школа при среднем сейсмическом риске. Моделируются сценарии пожара на различных этажах при продолжительности 30–45 мин. При этом учитывается быстрая, средняя и медленная продолжительность фазы охлаждения. Результаты нелинейного динамического анализа показали деградацию сейсмостойкости элементов, требующую учета полного цикла воздействия пожара (нагрев и охлаждение).

Кроме того, рассматривались возможные сценарии, когда землетрясение становится причиной пожара. Организованы полномасштабные испытания железобетонного каркаса, которые имитируют воздействие землетрясения при наличии начальных огневых повреждений [15]. Выбрана трехэтапная программа эксперимента: 1) цикловые квазистатические испытания; 2) огневые испытания одного из отсеков; 3) выдерживание под статической нагрузкой до разрушения. Для каркаса проанализированы температурные профили и перемещения на каждом этапе. Сделаны выводы о разрушительном действии подобных сценариев.

Можно отметить натурные испытания [16], в которых исследовалась эффективность применения высокопрочного фибробетона с полипропиленовыми волокнами для предотвращения взрывного отслоения защитного слоя бетона при нагреве. Рассмотрены четыре одноэтажных каркаса, которые подверглись стан-

дартному пожару по ISO 834. На следующем этапе прикладывалось низкочастотное циклическое воздействие. Были проанализированы температурные поля, деформированная схема при нагреве и охлаждении, проведена оценка огнестойкости фибробетона и пост-пожарной сейсмостойкости конструкций.

При осуществлении экспериментальных исследований изготовлено четыре железобетонные рамы с разным соотношением несущей способности колонн и ригелей [17]. После огневых испытаний в печи и квазистатических малоцикловых испытаний зафиксированы схемы трещинообразования, кривые гистерезиса, зоны образования пластических шарниров. Пожар снизил несущую способность, жесткость, пластичность и энергию разрушения железобетонных элементов. Выявлено изменение механизма разрушения колонн на хрупкий.

В работе [18] применялся численный анализ в ПК Ansys для 5-этажного 3-пролетного каркаса при 16 вариантах пожара. Для поврежденных пожаром рам спектральный расчет продемонстрировал снижение частот колебаний, рост смещений на уровне поврежденных этажей, перераспределение изгибающих моментов с догрузением элементов до 20 %. Модальный анализ показал смену форм колебаний.

Исследователями [19] проанализированы 5 рам. Колонны выполнены сталежелезобетонными. После огневых и цикловых испытаний выявлено достаточно хорошее сопротивление трубобетонных элементов огневому воздействию. Кривые гистерезиса сохранили первоначальную форму; несущая способность и демпфирование снизились незначительно, однако упала пластичность.

Из приведенного обзора следует, что пожар провоцирует снижение сейсмостойкости элементов железобетонного каркаса и их преждевременный отказ. Механизм разрушения элементов изменяется с изгибаемого и пластичного на сдвиговой и хрупкий, что является критичным при обеспечении сейсмостойкости системы в целом [20]. Возникает перераспределение усилий в элементах, снижаются пластичность и жесткость каркаса. Необходимо разрабатывать подходы, которые учитывают комплексные сценарии огневых воздействий: вариативность расположения, различные продолжительность и интенсивность, многофазность (нагрев и охлаждение).

Открытым остается вопрос нахождения наиболее опасного сценария воздействия пожара. Речь идет о выявлении пространственного положения и объема здания, которое охватывает пожар. Проведение расчетов на все возможные комбинации расположения пожара потребует чрезмерных вычислительных ресурсов, делая оптимизацию проектных решений практически невыполнимой задачей.

Цель настоящего исследования — определение наиболее опасного положения и интенсивности огневого воздействия на примере плоской железобетонной рамы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчетная схема. Объектом исследования выступает поперечная рама многоэтажного промышленного здания, выполненная из монолитного железобетона. Узел сопряжения ригелей с колоннами жесткий монолитный. Основные размеры и сечения приведены на рис. 1, а.

Моделирование осуществлялось с помощью ПК OpenSees v3.5.0 в графической оболочке OpenSees Navigator v2.5.8 (рис. 1, б). Расчетная схема каркаса — плоская бесшарнирная рама, имеющая три пролета и пять этажей. Нижние узлы жестко заделаны в основание.

Расстояние между осями колонн составляет 6 м, расстояние между осями ригелей — 3,5 м.

Сборное железобетонное перекрытие из многослойных плит с омоноличиванием стыков формирует жесткий диск, поэтому перемещения всех узлов в пределах одного этажа кинематически связаны по направлению оси OX . На концах колонн и ригелей в пределах габаритов узлов моделируются недеформируемые абсолютно жесткие участки. Учитывается продольный изгиб колонн (геометрическая нелинейность).

Нагрузки и поэтажные массы. Нагрузки собраны с учетом шага поперечных рам 6 м. Статические постоянные и временные нагрузки приняты с коэффициентами сочетаний 0,9 и 0,5 соответственно, согласно СП 14.13330.2018. Учитываются следующие статические нагрузки:

- собственный вес (удельный вес железобетонных конструкций 25 кН/м^3);
- постоянные нагрузки от собственного веса плит перекрытий (покрытия) и слоев пола (кровли) 5 кН/м^2 ;
- постоянные нагрузки от собственного веса наружных стеновых ограждений 5 кН/м , от собственного веса парапета $8,3 \text{ кН/м}$;
- временные нагрузки на перекрытия (полезная нагрузка) и покрытие (снеговая нагрузка) установлены 4 кН/м^2 .

Соответствующие равномерно распределенные погонные нагрузки приведены на рис. 1, б.

В качестве сейсмического воздействия задается акселерограмма для землетрясения Лома-Приета, Сан-Франциско, США (1989) (рис. 2). Параметры акселерограммы приведены в табл. 1.

Ускорения грунта прикладываются к узлам заделки расчетной схемы в основание вдоль оси X .

При расчете во временной области коэффициенты K_1 и K_0 приняты равными нулю.

Масса от приложенных нагрузок моделируется в виде точечных масс в узлах рамы с учетом коэффициентов сочетаний по СП 14.13330.2018.

Учитывается масса несущих конструкций, конструкций полов, перегородок, стеновых ограждений, временных нагрузок (полезная нагрузка и снеговая

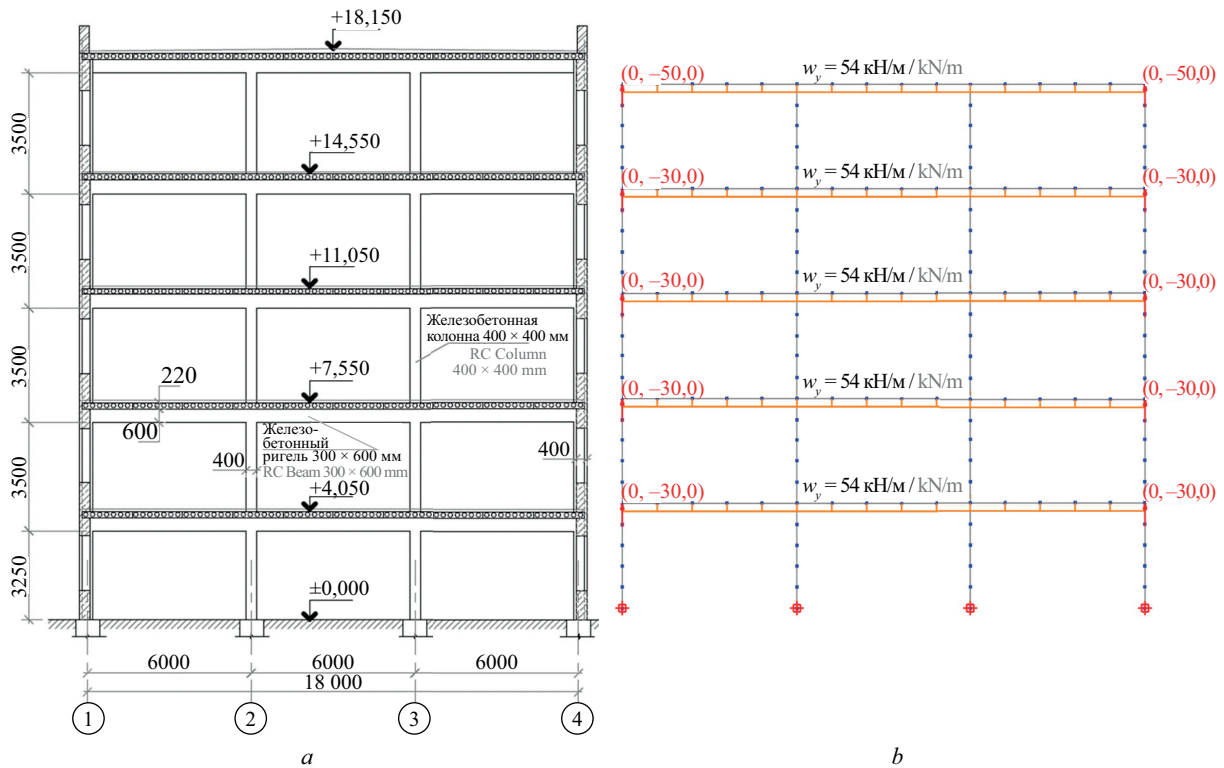


Рис. 1. Конструктивная (а) и расчетная (b) схемы железобетонной рамы

Fig. 1. Structural (a) and design (b) schemes of a reinforced concrete frame

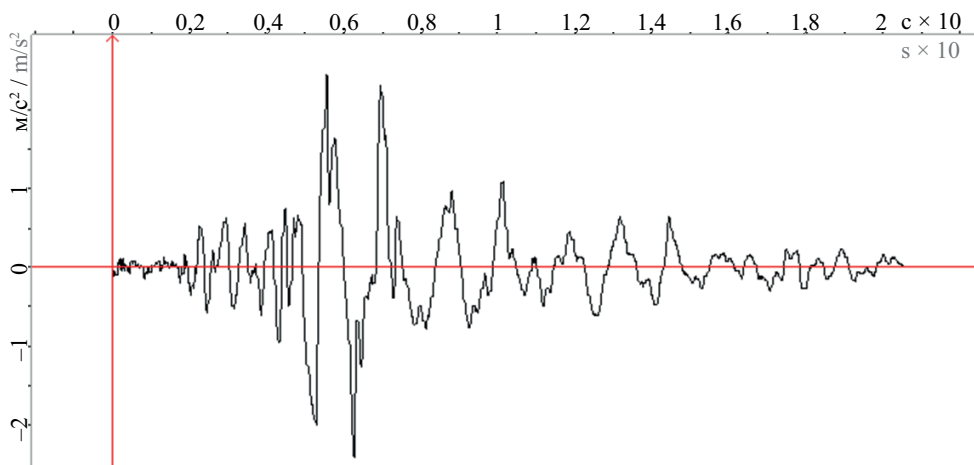


Рис. 2. Акселерограмма землетрясения Лома-Приета, США, 1989 [21]

Fig. 2. Loma Prieta earthquake accelerogram, USA, 1989 [21]

нагрузка). Массы имеют поступательные степени свободы в плоскости рамы.

Огневое воздействие. В исследовании рассмотрены пять сценариев огневого воздействия с различным положением очага пожара и его интенсивностью. Маркировка рам и варианты пожара приведены на рис. 3.

Варианты огневого воздействия выбраны с целью оценки влияния на сейсмостойкость рам положения очага пожара по высоте (на первом или третьем этажах) и его интенсивности (в одном или трех пролетах). Пары рам FF.1/FF.2 и FF.3/FF.4 позволяют

проанализировать вертикальное положение пожара, а FF.1/FF.3 и FF.2/FF.4 — охват по горизонтали.

Расчет температурных полей выполнен в комплексе SolidWorks 2024. Для каждого пролета, подверженного огневому воздействию, повреждения от пожара учитываются для двух колонн и верхнего ригеля. При этом огневое воздействие для ригеля и крайней колонны принято трехсторонним, для средней колонны — четырехсторонним. Высокотемпературное воздействие на грани элементов назначается в соответствии со стандартной температурной кривой по ГОСТ 30247–94 (ISO 834). Продолжитель-

Табл. 1. Основные параметры акселерограммы землетрясения Лома-Приета, США (1989)

Table 1. Main parameters of the Loma Prieta accelerogram, USA (1989)

Параметр Parameter	Значение Significance	Примечание Note
Максимальное ускорение, м/с ² Maximum acceleration, m/s ²	2,451	В момент времени 5,56 с At time 5.56 s
Максимальная скорость, м/с Maximum velocity, m/s	-0,427	В момент времени 5,35 с At time 5.35 s
Максимальное перемещение, м Maximum displacement, m	0,116	В момент времени 12,48 с At time 12.48 s
Среднеквадратичное ускорение, м/с ² Root Mean Square Acceleration, m/s ²	0,524	—
Среднеквадратичная скорость, м/с Root Mean Square Velocity, m/s	0,103	—
Средняя частота, Гц Average Frequency, Hz	0,892	—

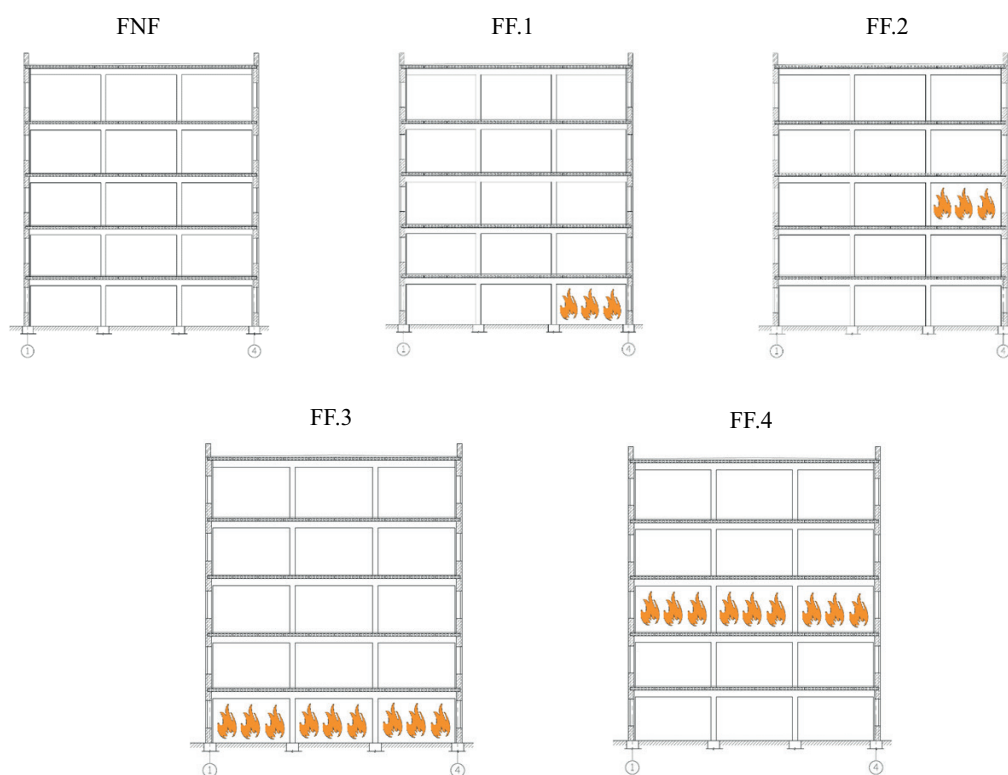


Рис. 3. Варианты огневого воздействия

Fig. 3. Fire scenarios

ность стандартного огневого воздействия принята равной 120 мин (рис. 4). При этом учитывается стадия охлаждения продолжительностью 60 мин.

Триангуляция сетки конечных элементов (КЭ) выполнена с разбивкой на тетраэдральные КЭ (максимальный размер элемента 50 мм).

Для бетона принимаются следующие теплотехнические характеристики:

$$\lambda = 1,14 - 0,00055T; \quad (5)$$

$$C = 0,71 - 0,00083T; \quad (6)$$

где λ — коэффициент теплопроводности бетона на карбонатном заполнителе, Вт/(м·°С); T — температура

нагрева рассматриваемого участка поперечного сечения, °С; C — удельная теплоемкость бетона на карбонатном заполнителе, кДж/(кг·°С).

Огневого воздействие назначается на поверхность элементов в виде граничных условий. Интерфейс между конструкцией и огневым воздействием принимается с учетом конвективного сопротивления [22]. Коэффициент конвективной теплопередачи $h = 25$ Вт/(м²·К).

Расчетные сечения и диаграммы деформирования. Колонны — железобетонные квадратного сечения 400 × 400 мм, ригели — железобетонные прямоугольного сечения 300 × 600 мм. Продольное и поперечное армирование приведено на рис. 5. За-

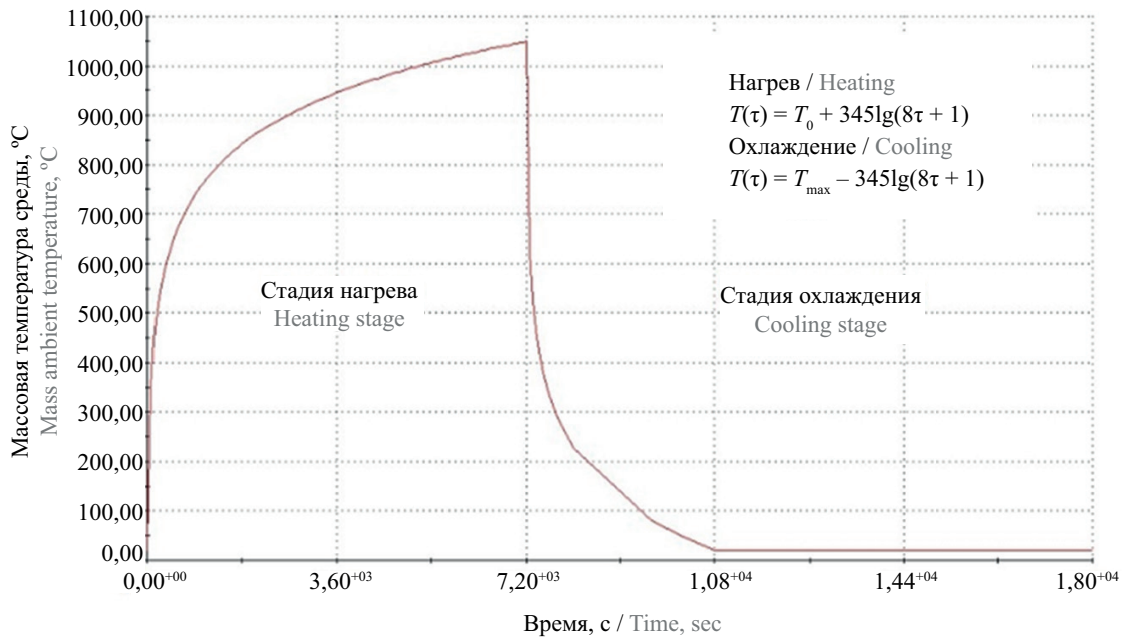


Рис. 4. Стандартная температурная кривая с учетом стадии охлаждения

Fig. 4. Standard temperature curve taking into account the cooling stage

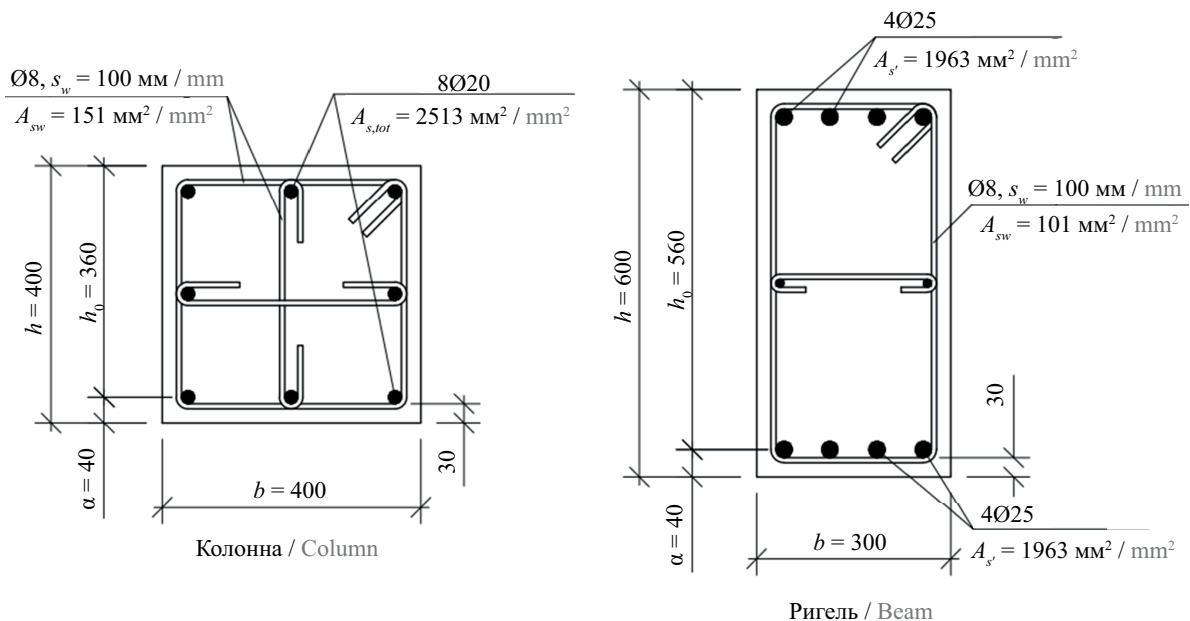


Рис. 5. Расчетные сечения

Fig. 5. Calculated sections

щитный слой бетона — 30 мм. Бетон конструкций класса В25, арматура класса А500.

Диаграммы материалов σ – ε приняты кусочно-линейными (рис. 6).

Используется численная модель Hysteretic. В качестве исходных данных заданы:

- 1) деформационные и прочностные параметры диаграмм, представленные на рис. 5;
- 2) коэффициенты $p_\varepsilon = 0,7$ и $p_\sigma = 0,8$ — учет увеличения и уменьшения жесткости конструкции при открытии и закрытии нормальных трещин;

- 3) коэффициент $D_1 = 0,08$ учитывает малоцикловую деградацию жесткости при нагружении;

- 4) коэффициент $\beta = 0,375$ учитывает малоцикловую деградацию жесткости при разгрузке.

Разбивка сечения выполняется с помощью волокнистой модели (Fiber-модель). Каждому волокну назначены механические характеристики бетона (арматуры) с учетом максимальной температуры его нагрева по результатам температурного анализа. Разбивка сечений имеет слоистую структуру, всего 7 слоев: защитный слой и 6 слоев ядра. При этом

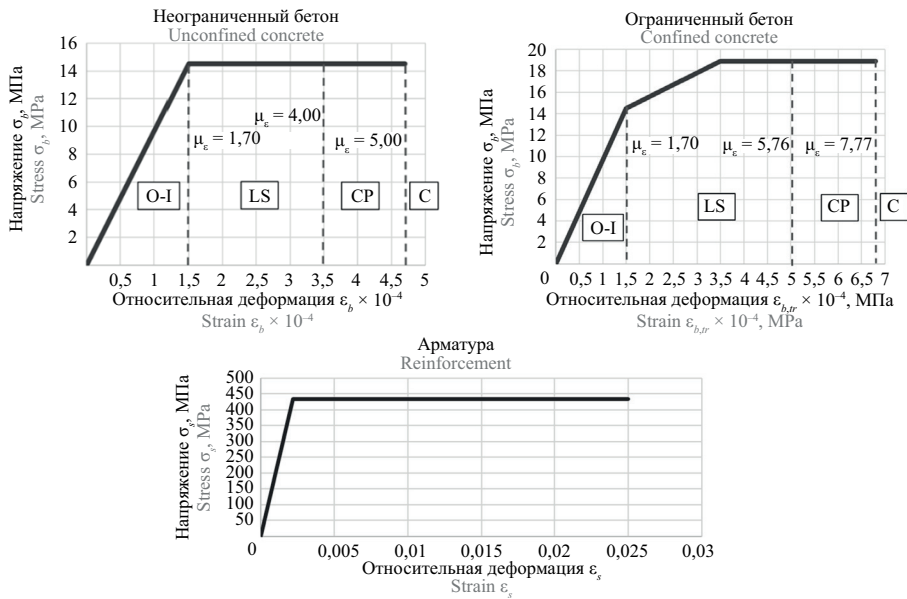


Рис. 6. Диаграммы деформирования материалов

Fig. 6. Material deformation diagrams

для колонн защитный слой имеет механические характеристики обычного бетона, а ядро — ограниченного бетона.

Механические характеристики арматуры и бетона в пределах каждого слоя постоянны и корректируются в зависимости от максимальной температуры прогрева данного слоя путем введения коэффициентов $\gamma_{b(st)}$, $\beta_{b(s)}$ и θ_b в соответствии с СП 468.1325800.2019.

Методика численного анализа. Нелинейный динамический анализ железобетонных рам осуществляется в ПК OpenSees поэтапно по следующей схеме:

1-й этап — статический анализ под действием вертикальных нагрузок (постоянных и временных). Нагрузки возрастают по линейной зависимости за 100 шагов. Применяется метод Ньютона – Рафсона с контролем сходимости по силе;

2-й этап — расчет собственных частот и форм колебаний — модальный анализ. Рассчитываются первые 5 мод. С учетом полученных значений устанавливается коэффициент демпфирования системы при параметре затухания $\xi = 0,05$ от критического;

3-й этап — нелинейный динамический расчет по акселерограмме Лома-Приета (1989). Временной шаг интегрирования $\Delta t = 0,01$ с (всего 2054 шага). Учитываются начальные деформации от статической вертикальной нагрузки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Теплотехнический расчет. Определены температуры в поперечных сечениях конструктивных элементов (рис. 7). Наибольший нагрев зафиксирован на внешних гранях с постепенным снижением температуры к центру сечения. К завершению фазы нагрева максимальная температура на поверхности

элементов достигла пиковых значений. Далее сечения дискретизировались на отдельные слои, для которых рассчитывались пиковые температуры с учетом кривой охлаждения.

Модальный анализ. В ходе модального анализа определены периоды и формы колебаний для пяти мод для каждой из рассматриваемых рам. Все формы представляют собой изгибные моды.

В табл. 2 приведены данные о периодах и частотах колебаний для пяти рам. При пожаре в крайней ячейке первого этажа (рама FF.1) периоды колебаний возрастают, указывая на рост гибкости конструкции по сравнению с FNF.

Максимальные значения периодов зафиксированы для рамы с пожаром во всех ячейках первого этажа (FF.3). Для рам с пожаром на третьем этаже также отмечается увеличение периодов, но в меньшей степени.

Кроме того, величина периода собственных колебаний зависит и от количества поврежденных конструкций в пределах этажа, для рам FF.3 и FF.4 наблюдается рост в сравнении с FF.1 и FF.2. Пожар значительно всего влияет на частоту первой моды.

Нелинейный динамический анализ. Проведено моделирование поведения пяти железобетонных каркасов с различными сценариями месторасположения и интенсивности огневого воздействия. Выявлены величины перемещений, внутренние усилия и схемы образования пластических шарниров. Сравнение графиков перемещений на уровне верха рам приведено на рис. 8. Возгорание по всей площади первого этажа вызвало существенное падение жесткости каркаса, что привело к росту перемещений на 32,2 %. Помимо этого, существенно возросли поэтажные перемещения для рам FF.3 и FF.4.

В каждом случае максимальные перемещения в поврежденных рамах превышают контрольные.

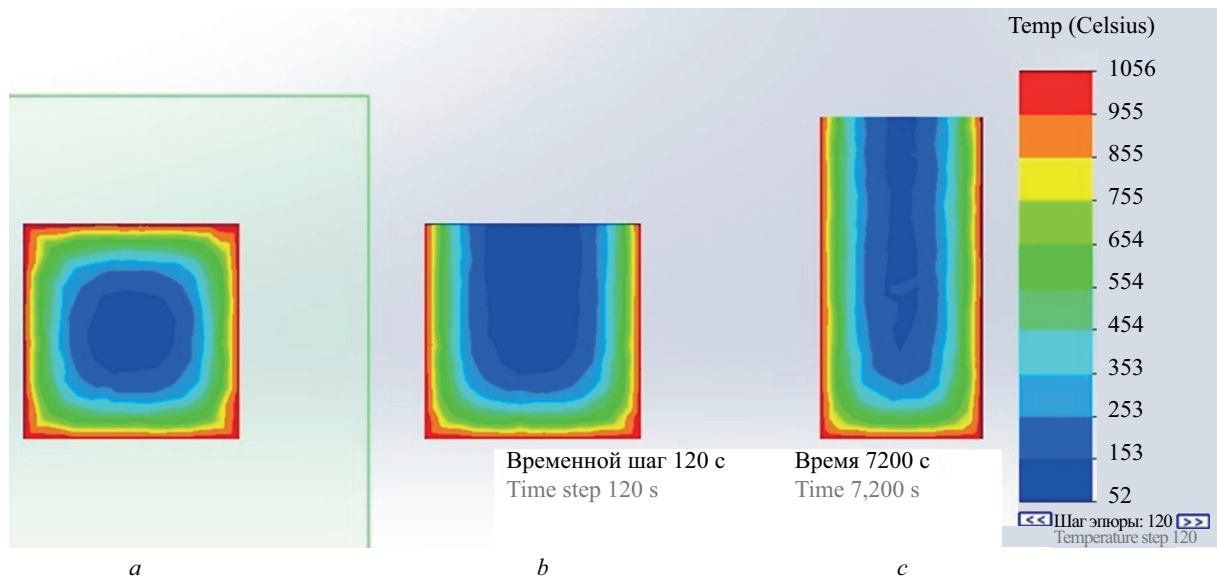


Рис. 7. Распределение температурных полей по сечениям элементов к концу стадии нагрева для: *a* — колонны при нагреве с четырех сторон; *b* — колонны с трех сторон; *c* — ригеля с трех сторон

Fig. 7. Distribution of temperature fields across the sections of elements by the end of the heating stage for: *a* — a column when heated from 4 sides; *b* — a column from 3 sides; *c* — a beam from 3 sides

Табл. 2. Результаты модального анализа

Table 2. Results of modal analysis

Параметр Parameter	Мода Mode	Марка рамы / Frame number				
		FNF	FF.1	FF.2	FF.3	FF.4
Период T , с Period T , s	1	1,595	1,671	1,649	1,773	1,706
	2	0,486	0,505	0,499	0,524	0,510
	3	0,253	0,260	0,259	0,266	0,265
	4	0,156	0,160	0,158	0,164	0,160
	5	0,113	0,114	0,116	0,112	0,119
Частота f , Гц Frequency f , Hz	1	0,627	0,598	0,607	0,564	0,586
	2	2,057	1,981	2,001	1,910	1,960
	3	3,961	3,847	3,857	3,758	3,769
	4	6,405	6,245	6,321	6,108	6,243
	5	8,907	8,785	8,647	8,674	8,399

Минимальный прирост наблюдается у рам с пожаром в одной ячейке (FF.1 и FF.2). На некоторых циклах амплитуды перемещений контрольной рамы даже превосходили перемещения поврежденных.

Степень повреждения каркаса существенно сказывается на результатах. При пожаре в трех ячейках на первом (FF.3) или третьем (FF.4) этаже перемещения резко возрастают. Максимальный прирост смещений приходится на поздние циклы при затухании колебаний.

Характер деформаций также меняется. Для рам FNF, FF.1 и FF.2 колебания симметричны по всему диапазону нагрузок. У рам FF.3 и FF.4 колебания асимметричны с большим смещением в направлении максимального ускорения, что свидетельствует о значительных остаточных деформациях.

Гистограмма на рис. 9 демонстрирует рост перекосов междуэтажных ячеек у рам после пожара. Максимальные перекосы приходятся на этаж возгорания, в то время как на верхних этажах они могут уменьшаться как для FF.1 и FF.3. Перемещения на ослабленном пожаром этаже резко увеличиваются из-за снижения его жесткости.

Эпюры изгибающих моментов для контрольной FNF и поврежденной FF.3 рам на пиковых смещениях представлены на рис. 10. Максимальные значения моментов концентрируются в зонах узлов рамы. В балках предел несущей способности достигается в опорных сечениях, что приводит к образованию пластических шарниров. Термические повреждения в раме FF.3 вызывают рост моментов в колоннах и балках, не затронутых огнем.

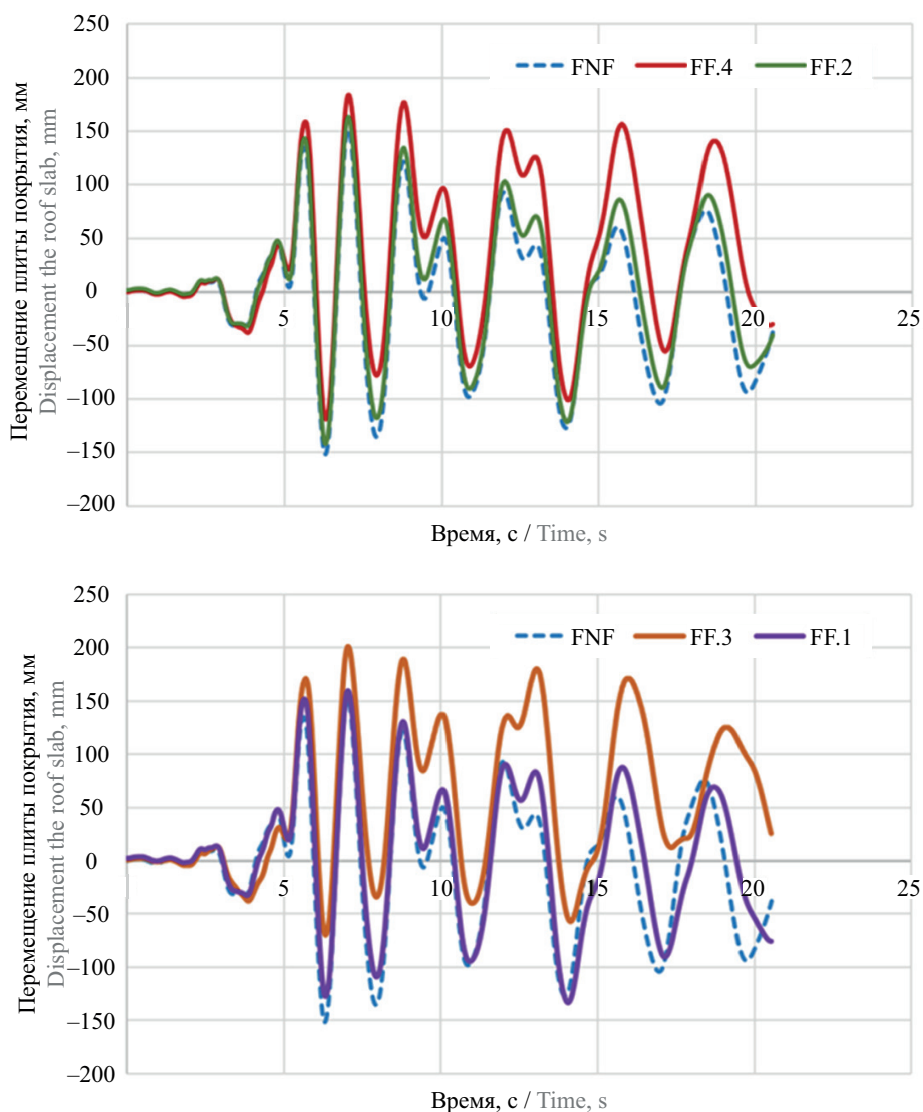
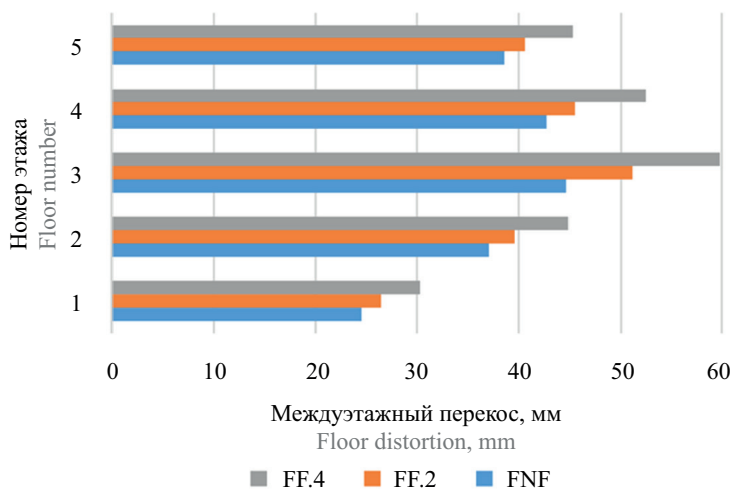


Рис. 8. Амплитуды перемещений железобетонных рам в уровне покрытия
 Fig. 8. Amplitudes of displacement of reinforced concrete frames at the roof level

Схемы формирования пластических шарниров представлены на рис. 11. На схеме приведены четыре уровня повреждений. Уровни повреждения назнача-

ются в зависимости от относительных деформаций бетона, которые указаны на соответствующих диаграммах на рис. 6.



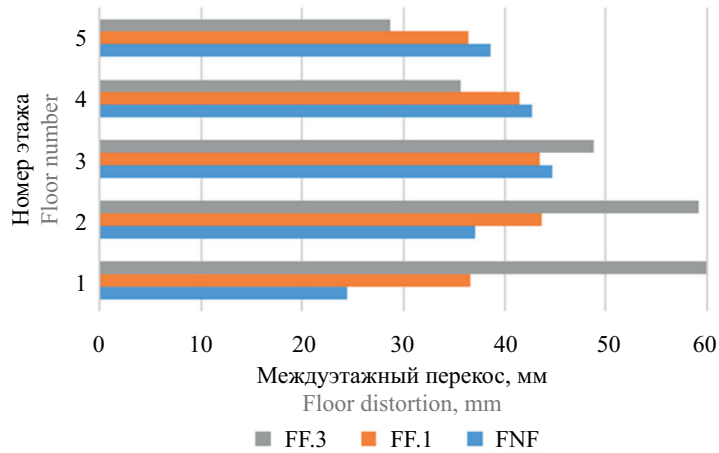


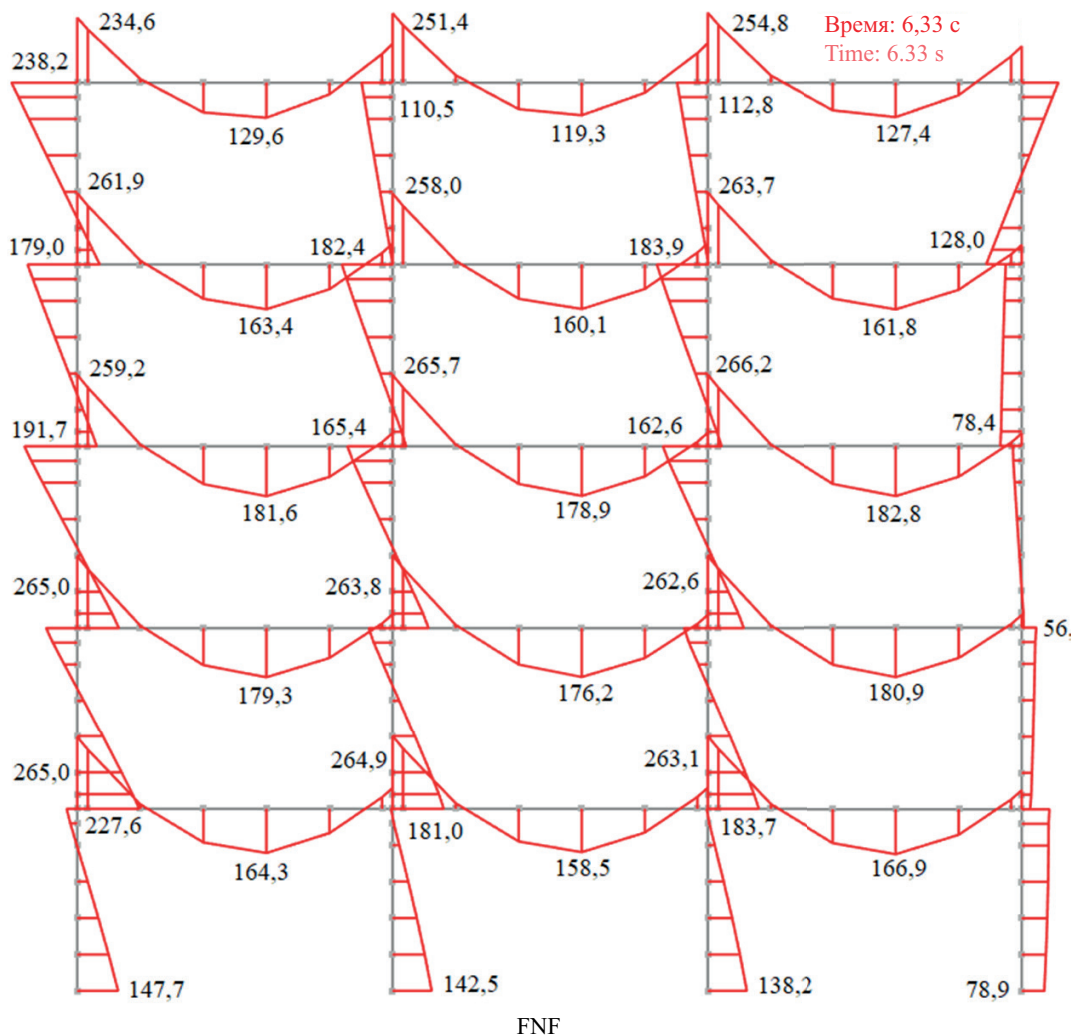
Рис. 9. Междуэтажные перекося железобетонных рам

Fig. 9. Floor distortions of reinforced concrete frames

В раме FF.1 шарниры пластичности образуются в колоннах поврежденной ячейки, демонстрируя ограниченный характер последствий пожара. Однако элементы в поврежденном пролете переходят в стадию полного разрушения. Шарниры в неповрежденных балках достигают уровня тяжелых

повреждений. Для рамы FF.2 в работу включаются колонны за пределами очага пожара, что отражает адаптивность системы к сейсмическим нагрузкам.

Максимальный уровень разрушений наблюдается в раме FF.3. Возгорание по всей площади первого этажа провоцирует резкий рост горизонтальных де-



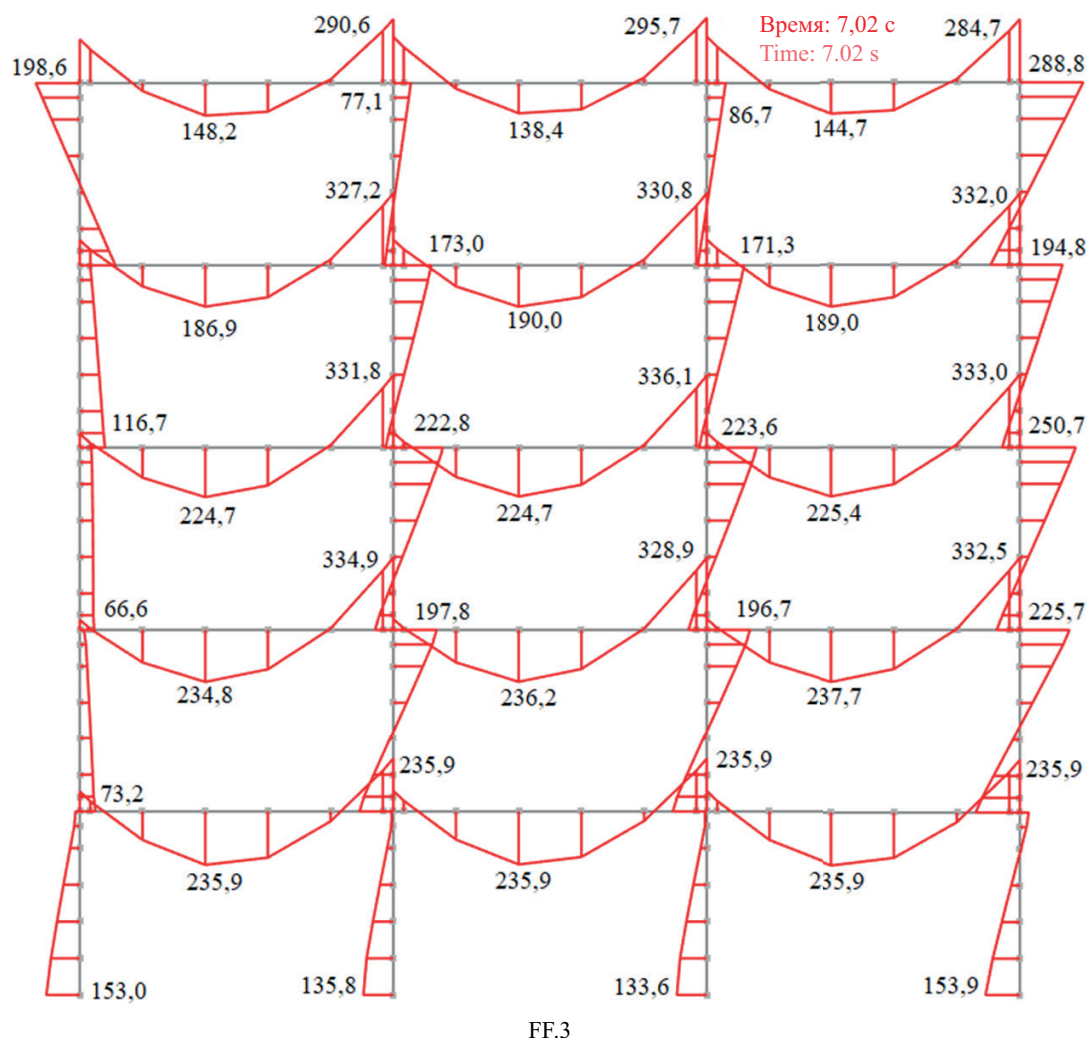


Рис. 10. Эпюры изгибающих моментов (в кН·м) в железобетонных рамах в момент пикового смещения
Fig. 10. Moment diagrams (in kN·m) in reinforced concrete frames at the moment of peak displacement

формаций. Уровень тяжелых повреждений достигнут для всех поврежденных элементов и большинства балок каркаса. Для рамы FF.4 обеспечивается более эффективное перераспределение усилий. В колоннах, включая поврежденные огнем, уровень деформаций остается в пределах допустимого (тяжелые повреж-

дения). Однако элементы в пределах очага пожара переходят в стадию разрушения.

Как видно из приведенных результатов, жесткость поврежденных пожаром рам существенно снижается. Причем в наибольшей степени этот эффект проявляется, когда пожар возникает на первом этаже



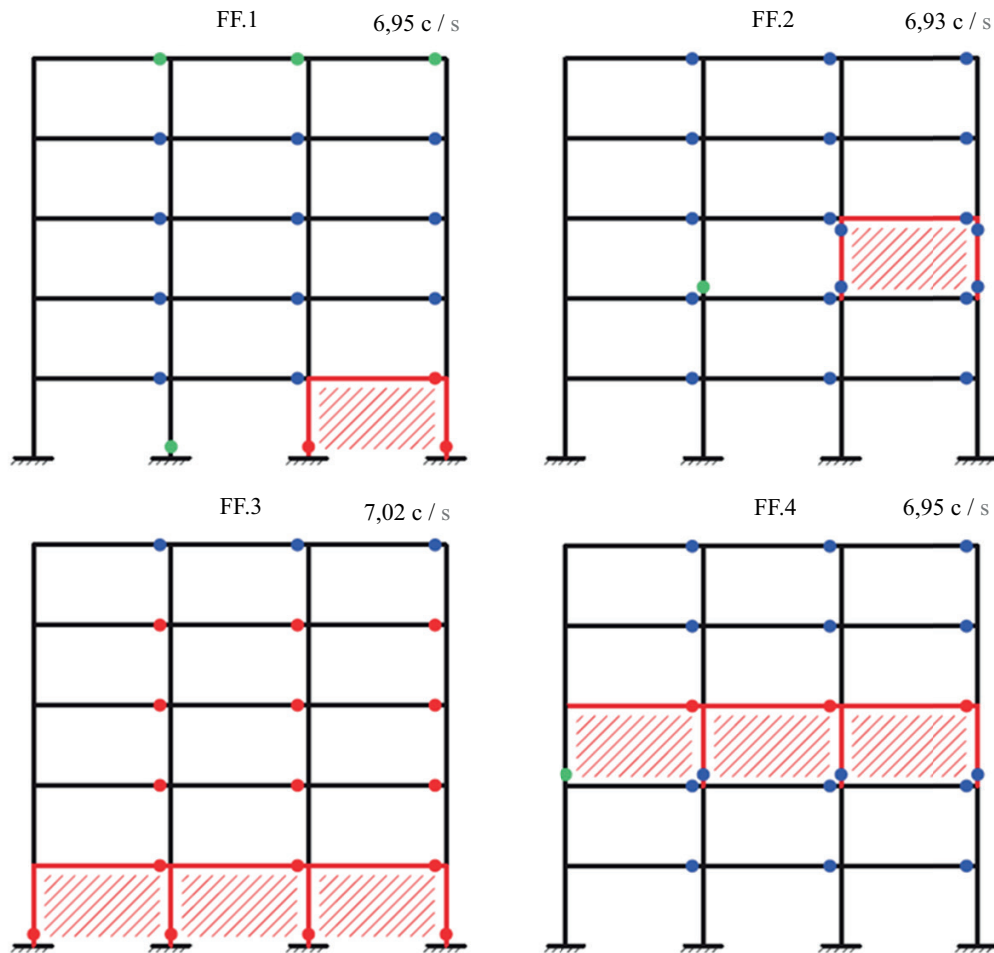


Рис. 11. Схемы образования пластических шарниров для железобетонных рам

Fig. 11. Schemes of formation of plastic hinges for reinforced concrete frames

(рамы FF.1 и FF.3). Это происходит вследствие того, что в определенной степени работа железобетонного каркаса на сейсмические нагрузки соответствует консольной схеме.

Помимо этого, в рамах, в которых возникает пожар во всех трех пролетах, имеет место асимметрия колебаний, когда каркас смещается в направлении наибольшего ускорения акселерограммы. Это является следствием накопления пластических деформаций в вертикальных несущих элементах.

Наблюдается увеличение сдвигов междуэтажных ячеек в пределах поврежденного пожаром этажа. Возрастание величины перекоса ячеек рамы может привести к разрушению стеновых заполнений во время землетрясения [23].

Из результатов расчета следует, что при повреждении рам пожаром появляется дополнительное увеличение изгибающих моментов в колоннах и ригелях железобетонного каркаса, воздействие пожара на которые не оказывалось. В поврежденных элементах максимальные усилия напротив снижаются. Наблюдается процесс приспособляемости рамы к внешнему воздействию.

Как видно из схем на рис. 11, образование пластических шарниров в контрольной раме FNF про-

исходит только в ригелях. Уровень деформаций в колоннах при этом соответствует упругой стадии работы. Таким образом, не нарушается геометрическая неизменяемость каркаса в целом.

При наличии повреждений от пожара в рамах образуются пластические шарниры не только в ригелях, но и в колоннах. Причем для рамы FF.2 уровни повреждений не достигают критических — не происходит обрушения системы. В остальных рамах (FF.1, FF.3 и FF.4) уровень деформации соответствует разрушению элементов. Наибольшие повреждения получила рама FF.3 после пожара на первом этаже во всех трех ячейках.

Можно сделать вывод, что огневое воздействие провоцирует перераспределение усилий в элементах железобетонного каркаса, в результате чего поврежденные пожаром элементы переходят в пластическую стадию и частично выключаются из работы, в то время как неповрежденные элементы за счет перераспределения усилий с ослабленных элементов перегружены. При проектировании подобных систем требуется обеспечить:

- необходимую пластичность элементов поврежденных пожаром элементов, в том числе колонн, при

этом не допуская хрупкого разрушения на всем диапазоне деформаций;

- учет возможности превышения расчетных усилий в элементах, находящихся вне очага возгорания, запас их несущей способности;
- устойчивость к прогрессирующему обрушению всей системы при потенциальном выключении из работы вертикальных несущих элементов, поврежденных пожаром.

Последнее требование особенно актуально для сценария, связанного с воздействием афтершоков на поврежденный пожаром каркас, поскольку в этом случае усиление поврежденных конструкций невозможно.

На стадии проектирования следует рассматривать целый спектр возможных вариантов огневого воздействия, которые будут определяться пределом огнестойкости конструкций здания и его объемно-планировочным решением. Особое внимание необходимо уделять наихудшему варианту огневого воздействия — пожару на первом этаже.

Следует учитывать при этом реальные сценарии возникновения пожара в здании, например наличие в уровне одного этажа нескольких пожарных отсеков, рассматривать динамическую природу пожара и пространственное распределение температурных полей [24].

Важно предусматривать проектные решения, направленные на локализацию пожара в ограниченном объеме здания — пожарном отсеке. Для железобетонных рам можно порекомендовать дополнительно учитывать правило, при котором размер пожарного отсека назначается из условия попадания в него не более 50 % вертикальных несущих конструкций. При значительной площади этажей в здании процент конструкций должен быть уменьшен.

Повышение сейсмостойкости железобетонного здания может быть достигнуто в результате оптимального резервирования несущей способности конструкций. Такие проектные решения должны быть основаны на расчетах, которые учитывают наиболее критические для сейсмостойкости каркаса сценарии огневого воздействия. Количество таких сценариев должно быть ограничено из ус-

ловия оптимизации вычислительных затрат. Полезным может оказаться опыт составления СП 385.1325800.2018, который устанавливает требования для обеспечения устойчивости здания к прогрессирующему обрушению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы параметры сейсмостойкости железобетонного рамного каркаса при различных вариантах огневого воздействия:

- периоды первой формы собственных колебаний увеличились по отношению к контрольной раме FNF на: 4,8 % для FF.1, 3,4 % для FF.2, 11,2 % для FF.3 и 7,0 % для FF.4;
- перемещения в уровне покрытия возросли на: 4,6 % для FF.1, 7,2 % для FF.2, 32,2 % для FF.3 и 21,1 % для FF.4;
- максимальные значения междуэтажных сдвигов возросли на: 14,3 % для FF.2, 34,0 % для FF.3 и 33,8 % для FF.4 (для рамы FF.1 роста не наблюдается);
- максимальные изгибающие моменты для рамы FF.3 увеличились на 26,3 % по сравнению с контрольной рамой FNF для ригелей и на 10,1 % для колонн;
- схемы разрушения железобетонных рам, поврежденных пожаром, изменяются: для всех рам наблюдается образование пластических шарниров в колоннах, уровень деформаций в элементах для всех рам, кроме FF.2, достиг уровня разрушения (уровень С).

Выявлено, что наиболее опасным вариантом огневого воздействия является пожар во всех трех ячейках первого этажа. Значительную роль играет площадь здания, охваченная пожаром. При этом в отдельных случаях, например при локальном пожаре на одном из промежуточных этажей (например, рама FF.2), сейсмостойкость каркаса снижается не существенно.

На стадии проектирования здания, находящегося в сейсмоопасном районе, рекомендуется учитывать возможные варианты возникновения огневого воздействия. При этом следует в большей мере повышать огнестойкость вертикальных несущих конструкций нижних этажей, а также разделять отдельные группы конструкций в пределах этажа противопожарными преградами и сокращать размеры пожарных отсеков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Liu L., Xiao J. Simulation on seismic performance of the post-fire precast concrete column with grouted sleeve connections // *Structural Concrete*. 2023. Vol. 24. Issue 3. Pp. 3299–3313. DOI: 10.1002/suco.202200663. EDN XEMKAI.
2. Melo J., Triantafyllidis Z., Rush D., Bisby L., Rossetto T., Arède A. et al. Cyclic behaviour of as-built and strengthened existing reinforced concrete columns previously damaged by fire // *Engineering Structures*. 2022.

Vol. 266. P. 114584. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114584. EDN EALVCA.

3. Гончаренко В.С., Четчина Т.А., Сибирко В.И., Мартемьянов С.И., Надточий О.В., Полехин П.В. и др. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: статистика пожаров и их последствий : стат. сб. Балашиха, 2022. 114 с. EDN LVXFQJ.

4. Ni S., Birely A.C. Simulation procedure for the post-fire seismic analysis of reinforced concrete structural

walls // Fire Safety Journal. 2018. Vol. 95. Pp. 101–112. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.011

5. *Tamrazyan A., Kabantsev O., Matseevich T., Chernik V.* Estimation of the Reduction Coefficient When Calculating the Seismic Resistance of a Reinforced Concrete Frame Building after a Fire // Buildings. 2024. Vol. 14. Issue 8. P. 2421. DOI: 10.3390/buildings14082421. EDN YWUXQR.

6. *Мкртычев О.В., Решетов А.А.* Обеспечение сейсмостойкости железобетонных зданий // Железобетонные конструкции. 2024. № 5 (1). С. 57–67. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.1.57-67. EDN FFLOKZ.

7. *Sunil J.C., Kamatchi P.* Nonlinear modelling strategies for seismic performance evaluation of reinforced concrete structures // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 65. Issue 6. Pp. 503–510. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.03.062. EDN WKZHPJ.

8. *Хачиян Э.Е.* Анализ величин перемещений, сдвиговых деформаций, скоростей и ускорений грунтов и спектров реакций по синтетической акселерограмме сильного землетрясения // Вопросы инженерной сейсмологии. 2022. Т. 49. № 4. С. 206–224. DOI: 10.21455/VIS2022.4-14. EDN QIPYTW.

9. *Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Павлов А.С.* О численном моделировании физически нелинейной динамической реакции зданий и сооружений при сейсмических воздействиях, заданных акселерограммами // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли российской федерации в 2019 году : сб. науч. тр. РААСН. 2020. С. 105–112. EDN LWZLJX.

10. *Ilki A., Demir U.* Factors affecting seismic behaviour of reinforced concrete structures after fire exposure // NED University Journal of Research. 2019. Pp. 31–41. DOI: 10.35453/nedjr-stmech-2019-0003

11. *Korsun V., Baranov A.* Mechanical properties of high-strength concrete after heating at temperatures up to 400 °C // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Pp. 454–463. DOI: 10.1007/978-3-030-72404-7_44

12. *Avetisyan L.A., Chapidze O.D.* Estimation of reinforced concrete seismic resistance bearing systems exposed to fire // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. P. 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012035. EDN XCEIYB.

13. *Mostafaei H.* A testing method for seismic resistance assessment of fire-damaged structures. 2011. DOI: 10.4224/20374365

14. *Mazza F., Imbrogno G.* Effects of Fire Duration on the Seismic Retrofitting with Hysteretic Damped Braces of R.C. School Buildings // Frontiers in Built Environment. 2019. Vol. 5. DOI: 10.3389/fbuil.2019.00141

15. *Kamath P., Sharma U.K., Kumar V., Bhargava P., Usmani A., Singh B. et al.* Full-scale fire test on an earthquake-damaged reinforced concrete frame // Fire Safety Journal. 2015. Vol. 73. Pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.firesaf.2015.02.013

16. *Xiao J.-Z., Li J., Huang Z.F.* Fire Response of High-Performance Concrete Frames and their Post-Fire Seismic Performance // ACI Structural Journal. 2008. Vol. 105. Issue 5. Pp. 531–540. DOI: 10.14359/19936

17. *Li L.Z., Liu X., Yu J.T., Lu Z.D., Su M.N., Liao J.H. et al.* Experimental study on seismic performance of post-fire reinforced concrete frame // Engineering Structures. 2019. Vol. 179. Pp. 161–173. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.080

18. *Tamrazyan A., Matseevich T.* The Criteria for Assessing the Safety of Buildings with a Reinforced Concrete Frame during an Earthquake after a Fire // Buildings. 2022. Vol. 12. Issue 10. P. 1662. DOI: 10.3390/buildings12101662. EDN QURCTH.

19. *Wang G.Y., Zhang Ch., Xu J., Zhang D.M.* Post-fire seismic performance of SRC beam to SRC column frames // Structures. 2020. Vol. 25. Pp. 323–334. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.03.016. EDN GUVXIH.

20. *Kabantsev O., Perelmuter A.* Plastic Behavior Particularities of Structures Subjected to Seismic Loads // Magazine of Civil Engineering. 2021. No. 5 (105). DOI: 10.34910/MCE.105.13. EDN NPOOWS.

21. *Mueller C., Glassmoyer G.* Digital Recordings of Aftershocks of the 17 October 1989 Loma Prieta, California, Earthquake // Open-File Report. 1990. DOI: 10.3133/ofr90503

22. *Федосов С.В.* О некоторых особенностях математического моделирования явлений тепломассопереноса на границах двухфазных сред // Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS «EESTE-2021»): программа и материалы пленарной сессии Международ. науч.-техн. симпозиума, посвящ. 110-летию А.Н. Плановского, в рамках Третьего Междунар. Косыгинского форума «Современные задачи инженерных наук». 2021. С. 56–64. DOI: 10.37816/eeste-2021-p-56-64. EDN VERDAA.

23. *Грановский А.В., Добрина К.Е., Тангамян Г.С.* Навесные кирпичные фасадные системы для сейсмических регионов России // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 1. С. 33–39. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.01.33-39. EDN WXWJUF.

24. *Law A., Stern-Gottfried J., Gillie M., Rein G.* The influence of travelling fires on a concrete frame // Engineering Structures. 2011. Vol. 33. Issue 5. Pp. 1635–1642. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.01.034. EDN OENNB.

Поступила в редакцию 22 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 29 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Ашот Георгиевич Тамразян — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 447901, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788; tamrazian@mail.ru;

Владимир Игоревич Черник — кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1091685, Scopus: 57218420224, ResearcherID: AAD-8260-2022, ORCID: 0000-0001-6240-9993; chernik_vi@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Liu L., Xiao J. Simulation on seismic performance of the post-fire precast concrete column with grouted sleeve connections. *Structural Concrete*. 2023; 24(3):3299-3313. DOI: 10.1002/suco.202200663. EDN XEMKAI.
2. Melo J., Triantafyllidis Z., Rush D., Bisby L., Rossetto T., Arède A. et al. Cyclic behaviour of as-built and strengthened existing reinforced concrete columns previously damaged by fire. *Engineering Structures*. 2022; 266:114584. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114584. EDN EALVCA.
3. Goncharenko V.S., Chechetina T.A., Sibirko V.I., Martemyanov S.I., Nadtochiy O.V., Polekhin P.V. et al. *Fires and Fire Safety in 2021: statistics of fires and their consequences: Statistical digest*. Balashikha, 2022; 114. EDN LVXFQJ. (rus.).
4. Ni S., Birely A.C. Simulation procedure for the post-fire seismic analysis of reinforced concrete structural walls. *Fire Safety Journal*. 2018; 95:101-112. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.10.011
5. Tamrazyan A., Kabantsev O., Matseevich T., Chernik V. Estimation of the Reduction Coefficient When Calculating the Seismic Resistance of a Reinforced Concrete Frame Building after a Fire. *Buildings*. 2024; 14(8):2421. DOI: 10.3390/buildings14082421. EDN YWUXQR.
6. Mkrtychev O.V., Reshchetov A.A. Ensuring seismic resistance of reinforced concrete buildings. *Reinforced Concrete Structures*. 2024; 5(1):57-67. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.1.57-67. EDN FFLOKZ. (rus.).
7. Sunil J.C., Kamatchi P. Nonlinear modeling strategies for seismic performance evaluation of reinforced concrete structures. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 65(6):503-510. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.03.062. EDN WKZHPJ.
8. Khachiyani E.Y. Analysis of the values of ground displacements, shear strains, velocities and accelerations, and response spectra of strong earthquake by synthetic accelerograms. *Problems of Engineering Seismology*. 2022; 49(4):206-224. DOI: 10.21455/VIS2022.4-14. EDN QIPYTW. (rus.).
9. Belostotsky A., Akimov P., Pavlov A. About numerical modelling of physically nonlinear dynamic reaction of buildings and structures under seismic actions defined by accelerograms. *Fundamental, search, and applied research by the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on the scientific support of the development of architecture, urban planning, and the construction industry in the Russian Federation in 2019: collection of scientific papers by the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. 2020; 105-112. EDN LWZLJX. (rus.).
10. Ilki A., Demir U. Factors affecting seismic behaviour of reinforced concrete structures after fire exposure. *NED University Journal of Research*. 2019; 31-41. DOI: 10.35453/nedjr-stmech-2019-0003
11. Korsun V., Baranov A. Mechanical properties of high-strength concrete after heating at temperatures up to 400 °C. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 454-463. DOI: 10.1007/978-3-030-72404-7_44
12. Avetisyan L.A., Chapidze O.D. Estimation of reinforced concrete seismic resistance bearing systems exposed to fire. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456:012035. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012035. EDN XCEIYB.
13. Mostafaei H. *A testing method for seismic resistance assessment of fire-damaged structures*. 2011. DOI: 10.4224/20374365
14. Mazza F., Imbrogno G. Effects of Fire Duration on the Seismic Retrofitting with Hysteretic Damped

- Braces of R.C. School Buildings. *Frontiers in Built Environment*. 2019; 5. DOI: 10.3389/fbuil.2019.00141
15. Kamath P., Sharma U.K., Kumar V., Bhargava P., Usmani A., Singh B. et al. Full-scale fire test on an earthquake-damaged reinforced concrete frame. *Fire Safety Journal*. 2015; 73:1-19. DOI: 10.1016/j.fire-saf.2015.02.013
16. Xiao J.-Z., Li J., Huang Z.F. Fire Response of High-Performance Concrete Frames and their Post-Fire Seismic Performance. *ACI Structural Journal*. 2008; 105(5):531-540. DOI: 10.14359/19936
17. Li L.Z., Liu X., Yu J.T., Lu Z.D., Su M.N., Liao J.H. et al. Experimental study on seismic performance of post-fire reinforced concrete frame. *Engineering Structures*. 2019; 179:161-173. DOI: 10.1016/j.eng-struct.2018.10.080
18. Tamrazyan A., Matseevich T. The Criteria for Assessing the Safety of Buildings with a Reinforced Concrete Frame during an Earthquake after a Fire. *Buildings*. 2022; 12(10):1662. DOI: 10.3390/buildings12101662. EDN QURCTH.
19. Wang G.Y., Zhang Ch., Xu J., Zhang D.M. Post-fire seismic performance of SRC beam to SRC column frames. *Structures*. 2020; 25:323-334. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.03.016. EDN GUVXIH.
20. Kabantsev O., Perelmuter A. Plastic Behavior Particularities of Structures Subjected to Seismic Loads. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 5(105). DOI: 10.34910/MCE.105.13. EDN NPOOWS.
21. Mueller C., Glassmoyer G. Digital Recordings of Aftershocks of the 17 October 1989 Loma Prieta, California, Earthquake. *Open-File Report*. 1990. DOI: 10.3133/ofr90503
22. Fedosov S.V. On some features of mathematical modeling of heat and mass transfer phenomena on the boundaries of two-phase media. *Improving energy and resource efficiency and environmental safety of processes and equipment in the chemical and related industries (ISTS "EESTE-2021") : program and materials of the plenary session of the International Scientific and Technical Symposium dedicated to the 110th anniversary of A.N. Planovsky, within the framework of the Third International Kosygin Forum "Modern Problems of Engineering Sciences"*. 2021; 56-64. DOI: 10.37816/eeste-2021-p-56-64. EDN VERDAA. (rus.).
23. Granovskiy A.V., Dobrina K.E., Tangamy-an G.S. Hinged brick facade systems for seismic regions of Russia. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 1: 33-39. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.01.33-39. EDN WXWJUF. (rus.).
24. Law A., Stern-Gottfried J., Gillie M., Rein G. The influence of travelling fires on a concrete frame. *Engineering Structures*. 2011; 33(5):1635-1642. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.01.034. EDN OENNBj.

Received December 22, 2025.

Adopted in revised form on December 29, 2025.

Approved for publication on January 29, 2026.

B I O N O T E S: **Ashot G. Tamrazyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head 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: 447901, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788; tamrazian@mail.ru;

Vladimir I. Chernik — Candidate of Technical Sciences, 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: 1091685, Scopus: 57218420224, ResearcherID: AAD-8260-2022, ORCID: 0000-0001-6240-9993; chernik_vi@mail.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Усиление грунтовых оснований методом гидроразрыва при горизонтальной проходке

Иван Владимирович Сугоняев, Яков Александрович Пронозин,
Елена Петровна Брагарь

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие технологий усиления грунтовых оснований зданий и сооружений различных типов представляет значимое направление в геотехническом строительстве. Особую актуальность приобретают методы, позволяющие создавать в грунтовом массиве сеть армирующих элементов с помощью различных инъекционных растворов. Цель исследования — научное обоснование и экспериментальная проверка эффективности метода, объединяющего технологию горизонтально направленного бурения (ГНБ) и управляемого гидроразрыва грунтового массива для создания сети инъекционных включений в насыпных грунтах.

Материалы и методы. В основе методологии лежит комплексный полевой эксперимент. Разработаны и апробированы конструкция горизонтального инъектора с резиновыми манжетами и технология его установки с помощью ГНБ. Исследование включало нагнетание цементного раствора с различным водоцементным отношением под контролируемым давлением, геодезический мониторинг грунтовой поверхности и последующую откопку околоинъекторного пространства для определения морфологии и геометрии цементных включений.

Результаты. Установлен характер формирования инъекционных тел в насыпных несвязных грунтах по сравнению со связными, выражающийся в образовании сферических объемных тел вместо плоских линз. Зафиксировано незначительное воздействие процесса инъецирования на грунтовую поверхность, что подтверждает его практическую применимость.

Выводы. Проанализированы механизмы распространения раствора и формирования цементных включений в грунтовом массиве. Показано, что предлагаемый метод позволяет целенаправленно создавать в основании сеть из точечных затвердевших цементных включений. Технология доказала свою принципиальную состоятельность и практическую значимость. Основные преимущества включают возможность производства работ без какой-либо остановки производственных процессов и выселения жильцов. Метод рекомендован для применения при усилении под фундаментами преимущественно мелкого заложения как существующих зданий и сооружений, так и при новом строительстве.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: горизонтально направленное бурение (ГНБ), усиление грунтовых оснований, гидроразрыв, манжетная технология, инъектор, цементация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сугоняев И.В., Пронозин Я.А., Брагарь Е.П. Усиление грунтовых оснований методом гидроразрыва при горизонтальной проходке // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 742–751. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.742-751

Автор, ответственный за переписку: Иван Владимирович Сугоняев, vanya_sugonyaev1999@mail.ru.

Soil foundation reinforcement using hydraulic fracturing during horizontal drilling

Ivan V. Sugonyaev, Yakov A. Pronozin, Elena P. Bragar
Industrial University of Tyumen (IUT); Tyumen, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The development of technologies for strengthening the soil foundations of buildings and structures of various types is an urgent area in geotechnical construction. Methods that make it possible to create a network of reinforcing elements in a soil mass using various injection solutions are becoming particularly relevant. The aim is to scientifically substantiate and experimentally verify the effectiveness of a method combining the technology of horizontal directional drilling (HDD) and controlled hydraulic fracturing of a soil mass to create a network of injection inclusions in bulk soils.

Materials and methods. The methodology is based on a comprehensive field experiment. The design of a horizontal injector with rubber cuffs and the technology of its installation using HDD were developed and tested. The study included injection of cement mortar with a different water-cement ratio under controlled pressure, geodetic monitoring of the soil surface and subsequent excavation of the near-injection space to determine the morphology and geometry of cement inclusions.

Results. The nature of the formation of injection bodies in loose, unconsolidated soils in comparison with cohesive soils has been established, which is expressed in the formation of spherical volumetric bodies instead of flat lenses. A minor effect of the injection process on the ground surface has been recorded, which confirms its practical applicability.

Conclusions. The mechanisms of the distribution of mortar and the formation of cement inclusions in the soil are analyzed. It is shown that the proposed method makes it possible to purposefully create a network of point-hardened cement inclusions at the base. The technology has proven its fundamental validity and practical importance. The main advantages include the possibility of carrying out work without any interruption of production processes and eviction of tenants. The method is recommended for use in reinforcement under foundations, mainly shallow foundations, of both existing buildings and structures, and in new construction.

KEYWORDS: horizontal directional drilling (HDD), reinforcement of ground foundations, hydraulic fracturing, cuff technology, injector, cementation

FOR CITATION: Sugonyaev I.V., Pronozin Ya.A., Bragar E.P. Soil foundation reinforcement using hydraulic fracturing during horizontal drilling. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):742-751. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.742-751 (rus.).

Corresponding author: Ivan V. Sugonyaev, vanya_sugonyaev1999@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение эксплуатационной надежности зданий и сооружений является важной инженерной задачей. Необходимость усиления грунтовых оснований возникает как при строительстве новых объектов, так и при реконструкции уже существующих. Известен широкий спектр технологий усиления грунтовых, в том числе слабых, оснований [1–20]. В частности, хорошо себя зарекомендовал метод усиления цементацией через направленные гидроразрывы, его исследовали М.Н. Ибрагимов, А. Камбефор, О.А. Мозгачева, М.А. Самохвалов, О.А. Шулятьев [1–12], а также М.Л. Нуждин, Я.А. Пронозин, М.А. Степанов, которые занимались усилением оснований по манжетной технологии [18–20]. Применение цементации по манжетной технологии при горизонтальной ориентации инъекторов упоминается в трудах: Жан Луи Валет [13], K. Gafar, K. Soga, A. Bezuijen [14–16], И.В. Кугушева [17].

Анализ литературных источников позволил выявить ряд ключевых особенностей данного метода, его преимущества и недостатки. Усиление гидроразрывами производят, как правило, способом устройства вертикальных, либо наклонных инъекторов, что часто требует остановки производственных процессов или выселения жильцов, если усиление осуществляется изнутри здания. Исходя из этого предложен способ усиления грунтовых оснований методом гидроразрыва по манжетной технологии при горизонтально ориентированной проходке, который дает возможность выполнять работы, не затрагивая внутреннее пространство здания.

Можно отметить, что усиление грунтовых оснований по манжетной технологии методом гидроразрыва при горизонтально ориентированной проходке может быть эффективным в ряде случаев, когда необходимо:

- усилить грунтовое основание под плитным фундаментом;
- усилить грунтовое основание под ленточным фундаментом большой протяженности;
- усилить грунтовое основание под вертикальными стальными резервуарами;

- заполнить и уплотнить пространство, которое появилось в процессе эксплуатации здания между сваями и ростверком;

- усилить грунтовое основание под новое строительство;

- проводить работы снаружи здания без остановки производства, выселения жильцов или ограничения движения транспорта.

Установка 20 пог. м горизонтального инъектора заняла 2 ч рабочего времени, в то время как установка 20 пог. м вертикальных инъекторов занимает от 4 до 6 ч.

Цель исследования состоит в определении возможного расширения области применения метода гидравлических разрывов грунта по манжетной технологии с использованием горизонтально направленного бурения (ГНБ).

Задача исследования заключается в установлении принципиальной работоспособности манжетной технологии для закрепления различных видов грунтов на основе экспериментальных исследований с выявлением закономерностей образования закрепленной зоны грунтового массива в зависимости от особенностей производства работ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксперимент выполнялся в г. Тюмени, п. Боровский. Грунтовое основание в зоне инъекции сложено насыпными грунтами, местами со строительным мусором. Грунтовые воды зафиксированы на отметке –1,6 м относительно поверхности земли. Инъектор был изготовлен из полиэтиленовой трубы 20 м. Пробурирование горизонтальной скважины и протягивание через нее инъектора осуществлялось с использованием установки ГНБ.

Эксперимент включал следующие виды работ:

1. Приготовление цементного раствора с применением миксерной станции и подача его при помощи инъекционного насоса посредством пакера в инъектор.

2. Контроль расхода цементного раствора, давления нанетания раствора, выхода раствора из грунтового основания, высотных отметок геодезических марок.



Рис. 1. Общий вид иньектора

Fig. 1. General view of the injector

3. Промывка иньектора после завершения каждого этапа нагнетания.

4. Откопка иньектора и прилегающего грунтового основания.

5. Фиксация формы и размеров иньекционных тел.

6. Обработка результатов.

В качестве иньектора применялась полиэтиленовая труба ПЭ 100 63 × 5,8 мм (рис. 1). Иньектор имел длину 20 м, на нем через каждый метр были расположены отверстия диаметром 10 мм для нагнетания раствора в грунт. На каждом таком отверстии были размещены резиновые манжеты шириной 10 см, выполняющие роль обратного клапана. Каждая манжета закреплялась хомутом из нержавеющей стали, также перед каждой манжетой предусмотрено защитное кольцо из полиэтиленовой трубы для предотвращения смещения манжеты при протягивании иньектора в грунтовом основании.

Иньектор протягивался в грунт с помощью установки ГНБ (рис. 2, а). Глубина и направление протягивания контролировались с использованием локационного оборудования (рис. 2, б).

Бурение производилось в два этапа:

1-й этап — бурение пилотной скважины;

2-й этап — протягивание иньектора через пилотную скважину.

Бурение выполнялось лопаткой шириной 80 мм, длина буровой штанги 1,8 м. Максимальный угол наклона составлял около $10 \pm 2\%$ на 1 м (угол наклона менялся в процессе бурения, так как были включения различного строительного мусора). Стадии протягивания иньектора представлены на рис. 3.

Нагнетание раствора проводилось в точках № 1–10. Так как нагнетание раствора планировалось делать в течение двух дней, то после промывки иньектора в первый день из-за того, что резиновые



Рис. 2. Установка для выполнения горизонтально направленного бурения (Vermeer Navigator) (а); локационное оборудование (б)

Fig. 2. Installation for horizontal directional drilling (Vermeer Navigator) (a); location equipment (b)

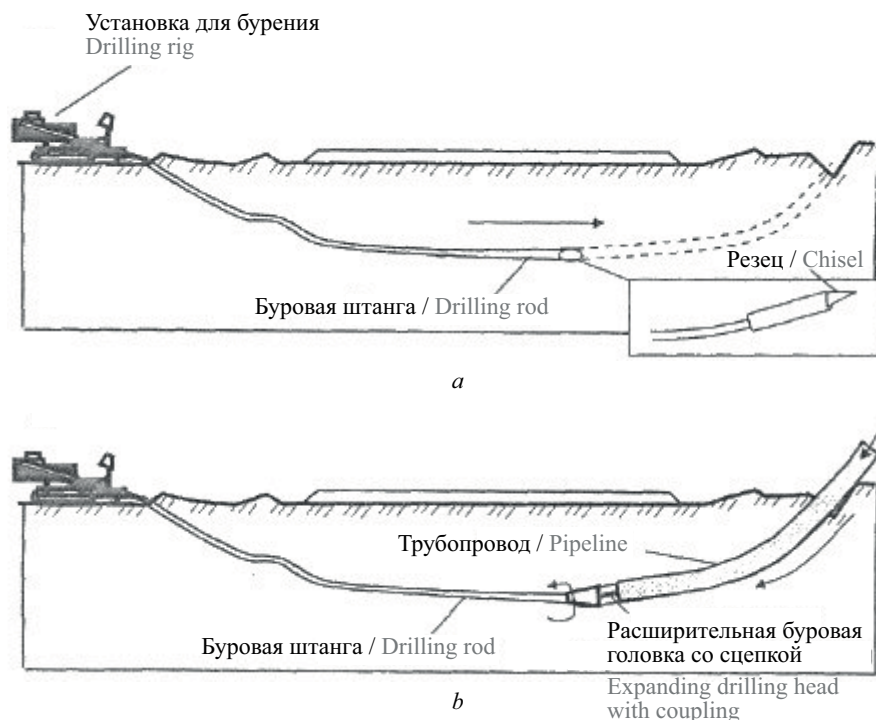


Рис. 3. Стадии установки инъектора: *a* — бурение пилотной скважины; *b* — протягивание инъектора
 Fig. 3. Stages of the injector installation: *a* — drilling of the pilot well; *b* — stretching the injector

Данные по нагнетанию цементного раствора

Data on injection of cement mortar

Номер Number	Объем цемента, кг Volume of cement, kg	Объем воды, кг Volume of water, kg	Водоцементное отношение Water-cement ratio	Давление нагнетания, МПа Discharge pressure, MPa	Количество циклов нагнетания Number of pumping cycles
1	100	60	0,6	0,3	1
2	50 + 50	30 + 30	0,6	0,4	2
3	50 + 50	30 + 30	0,6	4	2
4	150	105	0,7	2	1
5	200	120	0,6	2	1
6	50	15	0,3	0,5	1
7	200	140	0,7	6	1
8	100	50	0,5	0,5	1
9	200	160	0,8	6	1
10	100	40	0,4	0,5	1

манжеты сползли из проектного положения во время протягивания инъектора, цементный раствор затек обратно и затвердел, выполнить нагнетание в точках № 11–20 не удалось. Объем и давление нагнетания представлены в таблице.

Схема точек, через которые производилась подача раствора в грунт, показана на рис. 4.

Раствор подавался в грунт с применением миксерной станции через гидравлический пакер и рукава высокого давления. На рис. 5 приведен общий вид оборудования, с помощью которого производилось нагнетание цементного раствора в грунтовое основание.

На рис. 6 представлен гидравлический пакер.

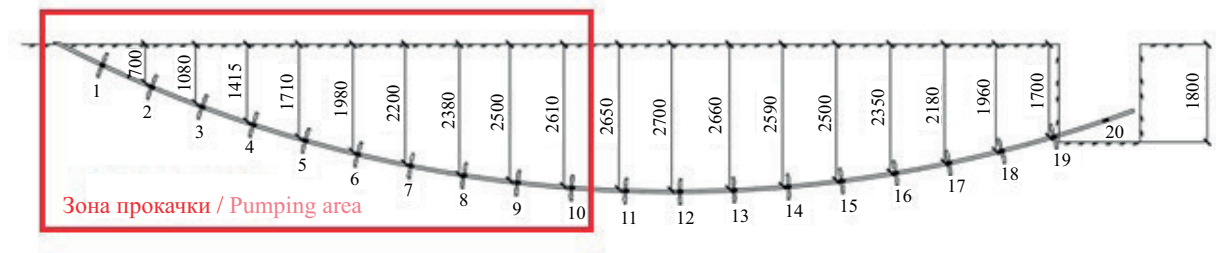


Рис. 4. Схема расположения отверстий в инжекторе

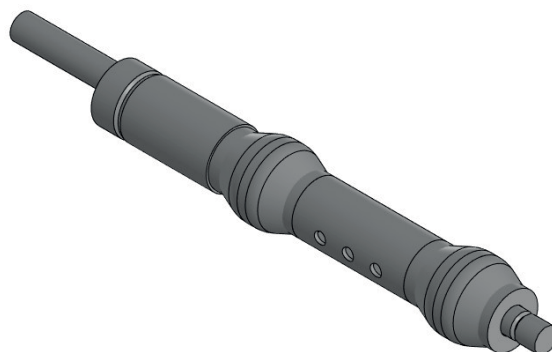
Fig. 4. Diagram of the holes in the injector



Контролируемый параметр — давление
The controlled parameter is pressure

Рис. 5. Общий вид оборудования: *a* — датчик контроля давления; *b* — станция для подачи гидравлического масла; *c* — миксерная станция; *d* — гидравлический пакер

Fig. 5. General view of the equipment: *a* — pressure control sensor; *b* — hydraulic oil supply station; *c* — mixing station; *d* — hydraulic packer



a

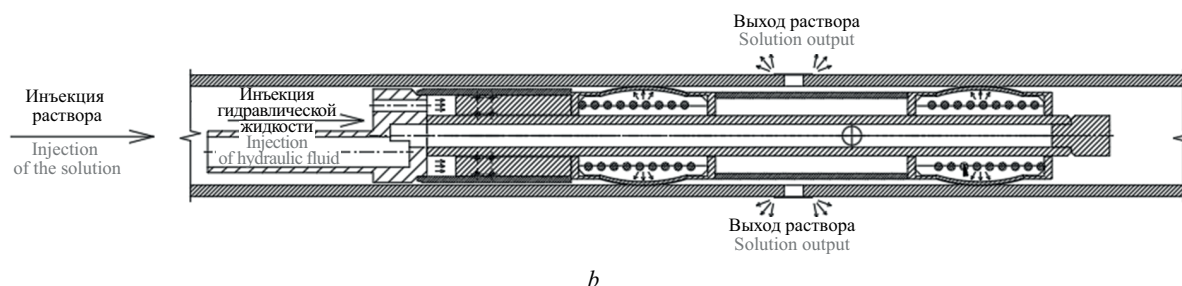


Рис. 6. Гидравлический пакер в рабочем состоянии: *a* — общий вид; *b* — разрез
 Fig. 6. Hydraulic packer in working condition: *a* — general view; *b* — section

На конструкцию гидравлического пакера для нагнетания твердеющего раствора в иньектор подана заявка в Роспатент.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате откопки иньектора и околоиньекторного пространства в районе точек № 1–5 зафиксированы иньекционные тела, характерные геометрические размеры которых от 12 до 64 см и массой от 5 до 150 кг (рис. 7). По периметру точек № 6–10 откопка не производилась, так как препятствовали грунтовые воды.

Можно сделать выводы о том, что в насыпном грунте характер иньекционных тел отличается от формы тел, представленных в статьях [1–3, 5]. Обычно иньекционные тела имеют плоскую геометрическую форму, которая расположена либо в вертикальной плоскости, либо в горизонтальной, хотя в работах зарубежных авторов К. Gafar, К. Soga, А. Bezuijen при проведении лотковых экспериментов с нагнетанием различных растворов в песчаный грунт иньекционные тела приближены к объемной форме [14–16]. В нашем случае в насыпном грунте иньекционные тела приближены также к объемной форме. На основе приве-



Рис. 7. Общий вид откопанного участка
 Fig. 7. General view of the excavated area



Рис. 8. Проведение геодезической съемки

Fig. 8. Conducting geodetic survey

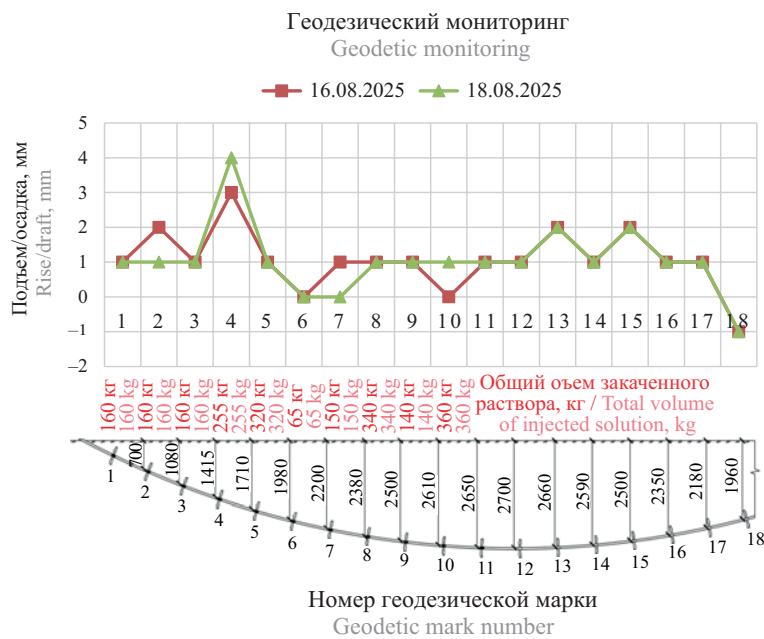


Рис. 9. Результаты геодезической съемки

Fig. 9. Results of geodetic survey

денных сведений видно, что при давлении нагнетания более 2 МПа геометрические размеры инъекционных тел больше размеров тел, полученных при давлении нагнетания 0,3–0,4 МПа.

В исследованиях О.А. Шулятьева и А. Камбефора [9, 12] говорится, что линза затвердевшего раствора, образующегося при гидроразрыве, имеет толщину от 20 до 30 мм в насыпных грунтах, от 5 до 20 мм — в песках и от 3 до 10 мм — в глинах. В нашем случае в насыпном грунте толщина цементного включения находится в пределах от 19 до 43 см, что в разы отличается от указанных выше опытных данных. Длина

распространения полостей может составлять несколько метров и зависит от объема инъецируемого раствора (в нашем случае зафиксирована длина распространения до 0,5 м).

Общая масса обнаруженных цементных тел в районе точек № 1–5 составила приблизительно 350 кг, а изначальная масса цемента в сухом состоянии — 650 кг, общая масса раствора — 1055 кг, необнаруженные остатки цементных включений могут свидетельствовать о том, что раствор распространялся в насыпном грунте на несколько метров в стороны. Это может означать и то, что раствор уходил по стенкам затруб-

ного пространства вдоль инъектора, а также часть цемента ушла на пропитку грунта при малом давлении нагнетания (0,3–0,4 МПа) в точках № 1 и 2.

При инъектировании производилась геодезическая съемка (рис. 8) по определению подъемов грунтового основания. Роль геодезических марок выполняли арматурные стержни, забитые на полметра в грунтовое основание через каждый метр над зоной нагнетания раствора.

Результаты геодезической съемки представлены на графике (рис. 9).

По результатам геодезического мониторинга обнаружен относительно небольшой подъем геодезических марок в районе точки № 4 до 4 мм.

Также видно, что в точке № 18 конечная осадка составила 1 мм, это связано с тем, что в эту точку производилась промывка инъектора, в связи с чем вода попадала в грунт и он проседал. Зафиксирован и подъем точек № 13 и 15, это связано с тем, что раствор из точки № 10 уходил в область точек № 13–15.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги полевого эксперимента по возможности расширения области применения метода гидроразрыва по манжетной технологии в насыпном грунте с включениями строительного мусора позволяют сделать следующие выводы:

1. Доказана принципиальная работоспособность манжетной технологии для закрепления различных видов грунтов цементацией на основе го-

ризонтального бурения и установки горизонтально ориентированных инъекторов.

2. Форма затвердевших цементных включений в насыпных основаниях приближена больше к объемной с размерами от 12 до 46 см, нежели к линзообразной, относящейся более, по оценкам других авторов, к иным грунтовым условиям.

3. Общая масса обнаруженных цементных тел в районе точек № 1–5 составила приблизительно 330 кг, при массе раствора 1055 кг, что позволяет утверждать о возможном значительном удалении сформированных цементных тел от инъектора, частичной пропитке насыпного грунта и потерях раствора в затрубном пространстве.

4. Подъемы геодезических марок до 4 мм указывают на качественную картину положительного влияния инъекции на напряженно-деформированное состояние основания при усилении и принципиальную возможность регулирования пространственного положения объектов.

5. Следует отметить важные особенности инъекторов преимущественно горизонтальной направленности:

- их существенная криволинейность на начальном и конечном участках и связанные с этим ограничения по кривизне с учетом длины и конструкции пакера для его свободного перемещения;
- возможность скопления раствора внутри инъектора в его нижней точке, что может создать сложности при многократной инъекции зон, при значительных временных интервалах инъектирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самохвалов М.А., Ашихмин О.В., Токарев А.Е., Паронко А.А. Результаты экспериментальных исследований формирования гидроразрывов в пылевато-глинистых грунтах // Инновации и инвестиции. 2020. № 3. С. 294–297. EDN LWCTHU.

2. Самохвалов М.А., Матюков А.А., Гейдт А.В., Паронко А.А. Результаты экспериментальных исследований манжетной технологии закрепления грунтов // Инновации и инвестиции. 2018. № 10. С. 249–252. EDN IEOHFZ.

3. Самохвалов М.А., Ашихмин О.В., Цернант А.А. Определение состава инъекционного раствора для повышения качества закрепления грунтов по манжетной технологии // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 5. С. 139–144. EDN XPPQKD.

4. Самохвалов М.А. Взаимодействие буроинъекционных свай, имеющих контролируемое уширение, с пылевато-глинистым грунтовым основанием : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2016. 22 с. EDN ZPYSLB.

5. Ибрагимов М.Н. Усиление слабых грунтов инъекцией растворов // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. № 4 (23). С. 69–80. EDN UAAIXI.

6. Ибрагимов М.Н. Вопросы проектирования и производства уплотнения грунтов инъекцией растворов по гидроразрывной технологии // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. № 2. С. 22–27. EDN TWONEH.

7. Ермолаев В.А. Закрепление оснований зданий и сооружений методом гидроразрыва при неоднократном инъектировании : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 25 с. EDN ZPCSOZ.

8. Ибрагимов М.Н., Семкин В.В. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов. М. : Издательство АСВ, 2012. 254 с. EDN QNPWLR.

9. Камбефор А. Инъекция грунтов. Принципы и методы. М. : Энергия, 1971. 333 с.

10. Шулятьев О.А., Мозгачева О.А. Снижение осадки фундамента за счет изменения напряженно-деформированного состояния основания путем инъекции твердеющего раствора // Вестник НИЦ «Строительство». 2020. № 3 (26). С. 121–148. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-3(26)-121-148. EDN LRQJXH.

11. Пронозин Я.А., Степанов М.А., Шуваев А.Н., Давлатов Д.Н. Взаимодействие системы усиления

свайных фундаментов с предварительно опрессованным грунтовым основанием эксплуатируемого сооружения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2018. Т. 9. № 3. С. 42–53. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.05. EDN YKDJR.

12. Шулятьев О.А. Применение гидроразрывной технологии в практике строительства // Применение гидроразрывной технологии в практике строительства : мат. конф. 2022. С. 7–22. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-7-22. EDN RYZZMP.

13. Жан-Луи Валет. Компенсационное нагнетание: технология в реальном времени // Метро и тоннели. 2002. № 4. С. 16–19.

14. Sanders M., Gafar K., van Tol A., Soga K., Bezuijen A. Fracturing of sand in compensation grouting // Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. 2008. Pp. 297–302. DOI: 10.1201/97802-3879986-40

15. Van Tol A., Bezuijen A., Kleinlugtenbelt R. Laboratory tests, compaction or compensation grouting // Physical Modelling in Geotechnics. 2006. DOI: 10.1201/noe0415415866.ch183

16. Bezuijen A. Compensation grouting in sand experiments, field experiences and mechanisms. 2010.

17. Кузусева И.В. Обоснование метода и технологии укрепления оснований исторических сооружений (на примере сооружений Свято-Троицкой Сергиевой Лавры) : дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 168 с. EDN VNVEWH.

18. Степанов М.А., Рачков Д.В., Пронозин Я.А. Исследование изменения напряженного состояния грунта при цементации в процессе проведения противоаварийных работ на объекте культурного наследия // Теория и практика фундаментостроения : сб. тез. докл. XV Междунар. симпозиума по реологии грунтов, посвящ. 95-летию КГАСУ и 60-летию кафедры «Основания, фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология». 2025. С. 91. EDN DATIGQ.

19. Pronozin Ya.A., Naumkina Yu.V., Epifantseva L.R., Gress Yu.D. Cementation of soils by wristband-pipe injection technology in conditions of thawing perpetually frozen soils // Construction and Geotechnics. 2023. Vol. 14. Issue 3. Pp. 107–120. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.3.10. EDN DJMVDE.

20. Нурждин М.Л., Нурждин Л.В., Фельдбуш А.В. Обзор способов усиления грунтового основания высоконапорным инъецированием // Construction and Geotechnics. 2025. Т. 16. № 2. С. 5–16. DOI: 10.15593/2224-9826/2025.2.01. EDN QVCNOK.

Поступила в редакцию 15 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 31 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Иван Владимирович Сугоняев** — аспирант, лаборант кафедры строительного производства и геотехники; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 1278640; vanya_sugonyayev1999@mail.ru;

Яков Александрович Пронозин — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного производства и геотехники; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 415568, Scopus: 55390829400, ORCID: 0000-0002-6173-2796; geofond.tgasu@gmail.com;

Елена Петровна Брагарь — доктор технических наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники; **Тюменский индустриальный университет (ТИУ)**; 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38; РИНЦ ID: 1012875, Scopus: 57210176942, ORCID: 0000-0003-1212-6324; bragarep@tyuiu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Samokhvalov M.A., Ashikhmin O.V., Tokarev A.E., Paronko A.A. Results of experimental investigations of the formation of hydraulic fractures in dusty-clay soils. *Innovation & Investment*. 2020; 3:294-297. EDN LWCTHU. (rus.).

2. Samokhvalov M.A., Matyukov A.A., Geydt A.V., Paronko A.A. Results of experimental studies of cuff technology of soil fixation. *Innovation & Investment*. 2018; 10:249-252. EDN IEOHFZ. (rus.).

3. Samokhvalov M.A., Ashikhmin O.V., Tsernant A.A. Determination of grout mix composition to

increase the quality of ground improvement for tube-anchette grouting. *Modern high technologies*. 2018; 5:139-144. EDN XPPQKD. (rus.).

4. Samokhvalov M.A. *Interaction of borehole injection piles with controlled broadening with a dusty-clay soil base : abstract of the dissertation ... candidate of technical sciences*. Tyumen, 2016; 22. EDN ZPYSLB. (rus.).

5. Ibragimov M. Strengthening of soft soils by grouting. *Bulletin of the Scientific Research Center of Construction*. 2019; 4(23):69-80. EDN UAAIXI. (rus.).

6. Ibragimov M.N. Design and implementation of soil stabilization by grout injection using hydrofracturing technology. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015; 2:22-27. EDN TWONEH. (rus.).
7. Ermolaev V.A. *Fixing the foundations of buildings and structures by hydraulic fracturing with repeated injection : abstract of the dissertation ... candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2013; 25. EDN ZPCSOZ. (rus.).
8. Ibragimov M.N., Semkin V.V. *Soil fixation by injection of cement mortars*. Moscow, ASV, 2012; 254. EDN QNPWLR. (rus.).
9. Kambefor A. Injection of soils. *Principles and methods*. Moscow, Energiya, 1971; 333. (rus.).
10. Shulyatyev O., Mozgacheva O. Reduction of foundation settlement by changing the stress-strain state of the soil bedding with injected hardening solution. *Bulletin of the Scientific Research Center of Construction*. 2020; 3(26):121-148. DOI: 10.37538/2224-9494-2020-3(26)-121-148. EDN LRQJXH. (rus.).
11. Pronozin Ya.A., Stepanov M.A., Shuvaev A.N., Davlatov D.N. Interaction of the system of strengthening pile foundations with preliminarily prime rated ground basis of operating facilities. *Bulletin of Perm State Technical University. Construction and Architecture*. 2018; 9(3):42-53. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.05. EDN YKKDJR. (rus.).
12. Shulyatyev O.A. Application of hydraulic fracturing technology in construction practice. *Application of hydraulic fracturing technology in construction practice : conference proceedings*. 2022; 7-22. DOI: 10.37538/2713-1149-2022-7-22. EDN RYZZMP. (rus.).
13. Jean-Louis Valet. Compensation injection: real-time technology. *Metro and Tunnels*. 2002; 4:16-19. (rus.).
14. Sanders M., Gafar K., van Tol A., Soga K., Bezuijen A. Fracturing of sand in compensation grouting. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. 2008; 297-302. DOI: 10.1201/978020387-9986-40
15. Van Tol A., Bezuijen A., Kleinlugtenbelt R. Laboratory tests, compaction or compensation grouting. *Physical Modelling in Geotechnics*. 2006. DOI: 10.1201/noe04-15415866.ch183
16. Bezuijen A. *Compensation grouting in sand experiments, field experiences and mechanisms*. 2010.
17. Kugusheva I.V. *Substantiation of the method and technology of strengthening the foundations of historical structures (on the example of the structures of the Holy Trinity Sergius Lavra) : dissertation ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2016; 168. EDN VNVEWH. (rus.).
18. Stepanov M.A., Rachkov D.V., Pronozin Ya.A. Study of changes in the stressed state of soil during cementation in the process of emergency response work at a cultural heritage site. *Theory and practice of foundation engineering : collection of abstracts of the XV International Symposium on Soil Rheology, dedicated to the 95th anniversary of KGASU and the 60th anniversary of the Department "Foundations, foundations, dynamics of structures and Engineering Geology"*. 2025; 91. EDN DATIGQ.
19. Pronozin Ya.A., Naumkina Yu.V., Epifantseva L.R., Gress Yu.D. Cementation of soils by wristband-pipe injection technology in conditions of thawing perpetually frozen soils. *Construction and Geotechnics*. 2023; 14(3):107-120. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.3.10. EDN DJMVDE.
20. Nuzhdin M.L., Nuzhdin L.V., Feldbush A.V. Overview of ways to strengthen the soil base high-pressure injection. *Construction and Geotechnics*. 2025; 16(2):5-16. DOI: 10.15593/2224-9826/2025.2.01. EDN QVCNOK. (rus.).

Received December 15, 2025.

Adopted in revised form on December 31, 2025.

Approved for publication on January 29, 2026.

B I O N O T E S : **Ivan V. Sugonyaev** — postgraduate student, laboratory assistant of the Department of Construction Production and Geotechnics; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarsky st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 1278640; vanya_sugonyaev1999@mail.ru;

Yakov A. Pronozin — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction Production and Geotechnics; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarsky st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 415568, Scopus: 55390829400, ORCID 0000-0002-6173-2796; geofond.tgasu@gmail.com;

Elena P. Bragar — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Production and Geotechnics; **Industrial University of Tyumen (IUT)**; 38 Volodarsky st., Tyumen, 625000, Russian Federation; ID RSCI: 1012875, Scopus: 57210176942, ORCID: 0000-0003-1212-6324; bragarep@tyuiu.ru.

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

Прогнозирование жесткостных характеристик бетона на основе аналитической гомогенизации

Валентин Викторович Кравченко

Брестский государственный технический университет (БрГТУ); г. Брест, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. Прогнозирование жесткостных характеристик бетона в рамках научного подхода является актуальной задачей современной теории бетоноведения. Учитывая представление о структуре бетона как трехфазного композиционного материала, состоящего из цементной матрицы, заполнителей и интерфейсной транзитной зоны между ними, наиболее оптимальными для решения данной проблемы служат методы аналитической гомогенизации. Существующие расчетные модели для прогнозирования жесткостных характеристик бетона на основе методов аналитической гомогенизации не в полной мере учитывают особенности его структуры, что обуславливает необходимость их совершенствования.

Материалы и методы. Предлагаемый усовершенствованный подход для прогнозирования жесткостных характеристик бетонного композита включает оценку его эффективного тензора жесткости (упругости) 4-го ранга на основе методов аналитической гомогенизации механики композиционных материалов.

Результаты. Сформулированы предпосылки и допущения усовершенствованного подхода. Приведены положения, рассматривающие зерна крупного заполнителя в виде композитных частиц как сферической формы, так и в виде сплюснутого сфероида для пластинчатой (лещадной) формы зерен и вытянутого сфероида для игольчатой формы зерен, с располагаемой вокруг них транзитной зоной. Предложен итерационный метод, по которому жесткостные характеристики бетона определяют последовательно, вычисляя на каждой итерации жесткостные характеристики композитной системы «цементная матрица – композитная частица i -й фракции». Представлена численная методика расчета эффективного модуля упругости бетона в рамках предлагаемого подхода.

Выводы. Предлагаемый усовершенствованный подход на основе аналитической гомогенизации позволяет оценивать жесткостные характеристики бетона с учетом особенностей его структуры в виде сфероидной формы зерен заполнителя, наличия интерфейсной транзитной зоны вокруг зерен заполнителя, а также высокой объемной концентрации заполнителя в его структуре.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бетон, жесткостные характеристики, интерфейсная транзитная зона, аналитическая гомогенизация, сфероидные включения, обобщенный самосогласованный метод, метод двойного включения, дифференциальный метод

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кравченко В.В. Прогнозирование жесткостных характеристик бетона на основе аналитической гомогенизации // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 752–762. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.752-762

Автор, ответственный за переписку: Валентин Викторович Кравченко, vvkavchenko@g.bstu.by.

Prediction of concrete stiffness characteristics using analytical homogenization

Valentin V. Kravchenko

Brest State Technical University (BrSTU); Brest, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. Prediction of concrete stiffness characteristics within a scientific framework remains a relevant task of modern concrete science. Considering concrete as a three-phase composite material consisting of a cement matrix, aggregates, and the interfacial transition zone between them, analytical homogenization methods are among the most effective approaches for addressing this problem. However, existing computational models for predicting the stiffness characteristics of concrete based on analytical homogenization methods do not fully account for the specific features of its structure, which necessitates their further development.

Materials and methods. The proposed approach for predicting the stiffness characteristics of concrete involves estimating its effective fourth-order stiffness (elasticity) tensor based on analytical homogenization methods from the micromechanics of composites.

Results. The assumptions of the proposed approach are formulated. Solutions are introduced that consider the grains of coarse aggregate as composite particles, both in the form of spheres and as oblate spheroids for flaky grains, and prolate spheroids for elongated grains surrounded by the interfacial transition zone. An iterative method is also proposed, whereby the stiffness characteristics of concrete are determined sequentially, calculating the stiffness characteristics of the composite system “cement matrix – composite particle of the i -th fraction” at each iteration. A numerical method for calculating the effective elasticity modulus of concrete according to the proposed approach is provided.

Conclusions. The proposed approach based on analytical homogenization is designed to evaluate the stiffness characteristics of concrete, taking into account the features of its structure, such as the spheroidal shape of the aggregates, the presence of an interfacial transition zone around them, and the high volumetric concentration of aggregates.

KEYWORDS: concrete, stiffness characteristics, interfacial transition zone, analytical homogenization, spheroidal inclusions, generalized self-consistent model, double inclusion model, differential model

FOR CITATION: Kravchenko V.V. Prediction of concrete stiffness characteristics using analytical homogenization. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):752-762. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.752-762 (rus.).

Corresponding author: Valentin V. Kravchenko, vkravchenko@g.bstu.by.

ВВЕДЕНИЕ

Жесткостные характеристики бетона, к которым относят модуль Юнга, коэффициент Пуассона и другие, — важные механические характеристики, необходимые для оценки его напряженно-деформированного состояния. В современной теории бетоноведения проблема прогнозирования жесткостных характеристик остается актуальной, выраженной в отсутствии консенсуса в научном сообществе относительно применяемых расчетных моделей, что во многом обусловлено гетерогенной структурой материала.

Бетон — трехфазный композиционный материал [1, 2], структура которого состоит из цементной матрицы (в технической литературе называемой цементным камнем), распределенных в ней зерен заполнителя и интерфейсной транзитной зоны (англ. — Interfacial Transition Zone), представляющей слой цементной матрицы, располагаемый вокруг зерен заполнителя, характеристики которого отличаются от основной матрицы. При этом цементный камень является поликристаллическим композитом, фазовый и количественный состав которого изменяется в процессе гидратации вяжущего.

Существующие подходы к прогнозированию жесткостных характеристик бетона включают феноменологический подход, основанный на аппроксимации экспериментальных данных, и научный подход, базирующийся на положениях механики композиционных материалов.

Одним из фундаментальных принципов механики композиционных материалов служит представление гетерогенной структуры композиционного материала в виде эквивалентной однородной среды с усредненными характеристиками, именуемыми эффективными. Эффективные характеристики композиционных материалов устанавливают методами аналитической и численной гомогенизации. Аналитическая гомогенизация также имеет другое распространенное название — гомогенизация усредненного поля (англ. — Mean-Field Homogenization). В настоящее время для определения жесткостных характеристик бетонного композита существует значительное количество расчетных моделей, в абсолютном большинстве которых используют методы аналитической гомогенизации [3–14].

Следует отметить, что применение численных методов гомогенизации к трехфазной композитной структуре бетона имеет существенное ограничение,

выраженное в необходимости моделирования пространственной геометрической модели структуры бетона, используемой затем для создания конечно-элементной или воксельной сетки. Особую сложность в моделировании пространственной геометрической модели структуры бетона представляет воспроизведение транзитной зоны вокруг зерен заполнителя, характеризующейся толщиной оболочки, значительно меньшей по сравнению с их размерами.

Эффективный тензор жесткости (модулей упругости) C^{eff} в методах аналитической гомогенизации определяют по следующему уравнению [15, 16]:

$$C^{eff} = \left(\sum_r f_r C_r : A_r \right) : \left(\sum_r f_r A_r \right)^{-1}, \quad (1)$$

где C_r — тензор жесткости (модулей упругости) 4-го ранга r -й фазы ($r = 1, 2, 3, \dots, n$); f_r — объемная концентрация r -й фазы в репрезентативном объеме; A_r — тензор 4-го ранга концентрации деформаций r -й фазы; « : » — двойное скалярное произведение (свертка) тензоров.

Тензор концентрации деформаций устанавливают из решения задачи Эшелби для упругого эллипсоидного включения (англ. — Eshelby's Inclusion Problem) [15, 16]:

$$A_r = [I + P_r : (C_r - C_0)]^{-1}; P_r = S_r : C_0^{-1}, \quad (2)$$

где I — единичный тензор 4-го ранга; P_r — поляризационный тензор 4-го ранга (также называемый тензором Хилла) r -й фазы, помещенной в гомогенную упругую среду с жесткостными характеристиками C_0 ; S_r — тензор Эшелби 4-го ранга r -й фазы.

Значения компонент тензора Эшелби в общем случае зависят от жесткостных характеристик C_0 , геометрической формы фазы и ее пространственной ориентации.

Одним из допущений, принятым в существующих расчетных моделях, является предположение, что все фазы бетонного композита (т.е. зерна заполнителя, независимо от его вида) обладают сферической формой. Такое допущение значительно упрощает определение A_r , поскольку в этом случае тензор Эшелби имеет следующий вид [15, 16]:

$$S_r = \frac{3 \cdot K_0}{3 \cdot K_0 + 4 \cdot G_0} V + \frac{6 \cdot (K_0 + 2 \cdot G_0)}{5 \cdot (3 \cdot K_0 + 4 \cdot G_0)} D, \quad (3)$$

где K_0 и G_0 — объемный модуль и модуль сдвига упругой среды; V и D — объемная (шаровая) и девиаторная составляющие единичного тензора 4-го ранга.

Допущение о сферической форме фаз довольно значимо, позволяет упростить вычисления, но искажает реальную форму зерен заполнителя, что особенно актуально для крупного заполнителя из горных пород, получаемого путем дробления, поскольку их геометрическая форма в большей степени приближена к форме эллипсоида вращения в виде сплюснутого сфероида для пластинчатой (лещадной) формы зерен и вытянутого сфероида для игольчатой формы зерен.

Другая ключевая особенность имеющихся расчетных моделей — повсеместное использование метода Mori – Tanaka аналитической гомогенизации [15, 16], математическую модель которого получают, принимая следующие равенства:

$$K_0 = K_{cm}; G_0 = G_{cm}, \quad (4)$$

где K_{cm} и G_{cm} — объемный модуль и модуль сдвига цементного камня.

Однако применение метода Mori – Tanaka для определения жесткостных характеристик бетонного композита сопряжено с рядом ограничений:

1. Метод не учитывает наличие межфазного слоя между матрицей и включением, поэтому для использования данного метода следует предварительно преобразовать исходную структурно-геометрическую модель композитной системы таким образом, чтобы исключить наличие межфазного слоя.

2. Точность метода снижается при объемной концентрации включения примерно более 30 % [17, 18]. Это связано с тем, что математическая модель метода не учитывает взаимное влияние полей напряжений и деформаций от смежных частиц включения, увеличивающееся по мере повышения их концентрации. Метод также чувствителен к контрасту (разнице в значениях жесткостных характеристик) между матрицей и включением, высокий контраст также способствует снижению точности получаемых результатов. Поскольку объемная концентрация заполнителя в бетоне может достигать 85 %, а в начальный период твердения наблюдается значительный контраст между цементным камнем и заполнителем, оценка эффективных жесткостных характеристик бетонного композита этим методом может содержать значительную погрешность.

Основная цель исследования заключается в совершенствовании существующих подходов к определению эффективных жесткостных характеристик бетонного композита на основе аналитической гомогенизации с учетом особенностей его структуры в виде сфероидной формы зерен заполнителя, наличия интерфейсной транзитной зоны вокруг зерен заполнителя, а также высокой объемной концентрации заполнителя в его структуре.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предпосылки и допущения предлагаемого подхода

1. Геометрическая форма зерен крупного заполнителя представлена в виде сплюснутого сфероида

для пластинчатой (лещадной) формы зерен, вытянутого сфероида для игольчатой формы зерен и сферической для зерен околосферической формы.

2. Количество зерен, имеющих форму вытянутого и сплюснутого сфероида, определяют через содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игольчатой формы в заполнителе. При этом предполагается, что количество зерен каждой формы одинаково и составляет половину значения показателя содержания.

3. Геометрическая форма зерен мелкого заполнителя рассматривается как сферическая.

4. Для описания гранулометрического состава заполнителя принято вероятностное распределение Gates – Gaudin – Schuhman¹:

$$P(d) = \left(\frac{d}{d_{\max}} \right)^m, \quad (5)$$

где $P(d)$ — доля зерен в заполнителе, размер которых меньше d ; d_{\max} — наибольшая крупность заполнителя; m — параметр распределения.

5. Размер зерен заполнителя характеризуют средним диаметром, определяемым для каждой фракции из гранулометрического состава. Для сфероидов средний диаметр соответствует размеру большей полуоси. Размеры малых полуосей выражают через коэффициент соотношения полуосей.

6. Средний диаметр зерен каждой фракции соответствует взвешенному по объему среднему размеру $D_{4,3}$ (средний диаметр Де Брукера) [19].

7. Интерфейсная транзитная зона распределена вокруг зерен заполнителя в виде равномерного слоя постоянной толщины.

8. Жесткостные характеристики интерфейсной транзитной зоны определяют через коэффициент соотношения к характеристикам цементной матрицы.

9. На границе раздела зерен заполнителя и транзитной зоны выполняются условия идеального контакта (англ. — perfect bound), обеспечивающие совместность полей напряжений и деформаций на границе раздела.

10. Все компоненты бетона (цементный камень, заполнители) рассматриваются как изотропный материал.

Композитная частица заполнителя

Поскольку интерфейсная транзитная зона образуется только на границе между зёрнами заполнителя и цементным камнем, ее можно рассматривать как неотъемлемую часть заполнителя в виде концентрической оболочки вокруг каждого зерна, вместе с ним образующей единое композитное включение — композитную частицу. Такой подход позво-

¹ ISO 9276-2:2014. Representation of results of particle size analysis Part 2: Calculation of average particle sizes/diameters and moments from particle size distributions. Ed. 2. 2014. 29 p.

ляет преобразовать исходную трехфазную модель бетонного композита к композитной системе «цементный камень — композитные частицы», в которой межфазный слой отсутствует. В исследованиях [20, 21] его применяли для моделирования композитных частиц сферической формы в структуре бетона.

Для определения эффективных жесткостных характеристик композитной частицы наиболее подходящими методами аналитической гомогенизации являются:

1) для композитных частиц сферической формы — обобщенный самосогласованный метод (англ. — Generalized Self-Consistent Scheme, GSCS) [22], в котором структура композита представлена в виде сферического включения, вокруг которого расположена концентрическая оболочка матрицы, помещенного в эквивалентную гомогенную среду с эффективными свойствами;

2) для композитных частиц сфероидной формы — метод двойного включения (англ. — Double Inclusion Model, DIM) [23], в котором композит обладает схожей структурой, только в виде эллипсоидного включения. С целью определения эффективных характеристик композит рассматривают в двух состояниях, при которых эффективные свойства гомогенной среды сперва соответствуют свойствам матрицы, а затем — включения.

Эффективные жесткостные характеристики сферических композитных частиц по GSCS определяют, используя следующие уравнения [22]:

$$K_p^{eff} = K_{iz} + \frac{f_{agg} \cdot (K_{agg} - K_{iz})}{1 + (1 - f_{agg}) \cdot \left(\frac{K_{agg} - K_{iz}}{K_{iz} + 4/3 \cdot G_{iz}} \right)}; \quad (6)$$

$$A \cdot \left(\frac{G_p^{eff}}{G_{iz}} \right)^2 + B \cdot \left(\frac{G_p^{eff}}{G_{iz}} \right) + C = 0,$$

где K_p^{eff} и G_p^{eff} — эффективный объемный модуль и модуль сдвига композитной частицы; K_{agg} и G_{agg} — эффективный объемный модуль и модуль сдвига зерен заполнителя; K_{iz} и G_{iz} — эффективный объемный модуль и модуль сдвига зерен интерфейсной транзитной зоны; f_{agg} — объемная концентрация зерна заполнителя в композитной частице; A , B , C — коэффициенты, зависящие от f_{agg} , G_{agg}/G_{iz} , коэффициентов Пуассона ν_{agg} и ν_{iz} , определяемые по формулам, приведенным в работе [22].

Объемную концентрацию зерна заполнителя в композитной частице устанавливают по зависимости:

$$f_{agg} = \frac{a^2 \cdot c}{(a + \delta_{iz})^2 \cdot (c + \delta_{iz})}, \quad (7)$$

где a — размер полуоси сфероиды, соответствующей экваториальному радиусу; c — размер полуоси сфе-

роида, соответствующей полярному радиусу; δ_{iz} — толщина равномерного слоя интерфейсной транзитной зоны.

Для сферы $a = c = r_{agg}$ (где r_{agg} — средний радиус зерна заполнителя, равный половине $D_{4,3}$); для вытянутого сфероида $c = r_{agg}$, $a = r_{agg}/\rho$ (где $\rho > 1$ — коэффициент соотношения полуосей); для сплюснутого сфероида $a = r_{agg}$, $c = r_{agg} \cdot \rho$ (где $\rho < 1$).

Эффективные жесткостные характеристики эллипсоидных композитных частиц по DIM определяют с помощью уравнения [23]:

$$C_p^{eff} = \left[\phi (C_{MT})^{-1} + (1 - \phi) (C_{MT^{-1}})^{-1} \right]^{-1}, \quad (8)$$

где C_p^{eff} — эффективный тензор жесткости 4-го ранга композитной частицы; C_{MT} — тензор жесткости 4-го ранга, определенный методом Mori – Tanaka для $C_0 = C_{iz}$ (уравнения (1), (2)); ϕ — квадратичный сплайн, $\phi = 0,5 \cdot f_{agg} \cdot (1 + f_{agg})$; $C_{MT^{-1}}$ — тензор жесткости 4-го ранга, определенный методом Mori – Tanaka для $C_0 = C_{agg}$.

Итерационная схема для определения эффективных жесткостных характеристик

После преобразования к композитной системе «цементный камень – композитные частицы» основной проблемой при определении ее эффективных жесткостных характеристик остается высокая концентрация композитных частиц. Одним из эффективных решений является итерационный подход, по которому на каждой i -й итерации устанавливают эффективные жесткостные характеристики двухфазной композитной системы «цементная матрица — композитная частица i -й фракции».

Гомогенная среда с эффективными жесткостными характеристиками, определенными на i -й итерации, служит фазой матрицы для $i + 1$ -й итерации. Для первой итерации фазой матрицы является цементный камень. Соответственно эффективные жесткостные характеристики бетонного композита получают на последней итерации.

Количество итераций соответствует количеству фракций заполнителя, которое устанавливают из гранулометрического состава заполнителя, таким образом, чтобы содержание каждой фракции в бетонном композите не превышало определенного предельного значения в зависимости от применяемого метода гомогенизации. Также следует учитывать, что для композитных частиц, образованных из крупного заполнителя, в рамках каждой итерации фактически реализуют три последовательных итерации, учитывающих как сферическую, так и сфероидную форму композитных частиц.

Порядок итераций, при котором размер композитных частиц последовательно изменяется от наименьшего к наибольшему, предпочтителен, позволяющий снизить влияние контраста между матрицей и включением, поскольку значения жесткостных ха-

рактических композитных частиц увеличиваются по мере увеличения размера зерна заполнителя.

В данном исследовании для определения эффективных жесткостных характеристик на каждой итерации выбран дифференциальный метод (англ. — Differential Scheme) аналитической гомогенизации [16] с предельным содержанием каждой фракции в структуре бетона не более 15 %.

В основе дифференциального метода лежит инкрементный процесс в виде постепенного добавления в матрицу бесконечно малого количества включения до тех пор, пока его концентрация не достигнет заданного значения. Высокая точность при малых концентрациях включения делает его оптимальным для использования в итерационной схеме на каждой итерации.

С математической точки зрения инкрементный процесс представляет систему дифференциальных уравнений эффективных жесткостных характеристик композита относительно концентрации включения, интегрируемых до заданного значения этой концентрации. В контексте рассматриваемой итерационной схемы такая система дифференциальных уравнений принимает следующий вид:

$$\frac{d\mathbf{C}_i^{eff}}{dc_{p,i}} = \frac{1}{1-c_{p,i}} (\mathbf{C}_{p,i}^{eff} - \mathbf{C}_i^{eff}) : \mathbf{A}_{p,i}; \quad (9)$$

$$\mathbf{C}_i^{eff} (c_{p,i} = 0) = \begin{cases} \mathbf{C}_{cm} & i = 0 \\ \mathbf{C}_{i-1}^{eff} & i > 1 \end{cases}$$

где \mathbf{C}_i^{eff} — эффективный тензор жесткости 4-го ранга бетонного композита на i -й итерации; $\mathbf{C}_{p,i}^{eff}$ — эффективный тензор жесткости 4-го ранга композитной частицы i -й фракции; $\mathbf{A}_{p,i}$ — тензор 4-го ранга концентрации деформаций композитной частицы i -й фракции; \mathbf{C}_{cm} — тензор жесткости 4-го ранга цементного камня; $c_{p,i}$ — объемная концентрация композитных частиц i -й фракции в бетоне, определяемая как:

$$c_{p,i} = c_{agg} \cdot f_{s,i} \cdot \frac{1}{f_{agg,i}}, \quad (10)$$

где c_{agg} — объемная концентрация заполнителя в бетоне; $f_{s,i}$ — содержание зерен i -й фракции в заполнителе, определяемое из гранулометрического состава. Множитель $1/f_{agg,i}$ учитывает увеличение объемной концентрации эффективных частиц i -й фракции в структуре бетона по сравнению с соответствующей объемной концентрацией зерен заполнителя.

Стоит отметить ряд особенностей системы дифференциальных уравнений (9):

1) формально система состоит из 36 уравнений, если тензор жесткости 4-го ранга рассматривать в матричном представлении, например в нотации Фойгта (англ. — Voigt notation). Учитывая его симметрию, характерную, например, для изотропных материалов, фактически система уравнений может быть представлена в виде 12 уравнений;

2) уравнения являются нелинейными, поскольку при вычислении тензора $\mathbf{A}_{p,i}$ принимают $\mathbf{C}_0 = \mathbf{C}_i^{eff}$, таким образом, дифференциальный метод по сути близок к самосогласованной схеме (Self-Consistent Scheme);

3) дифференциальные уравнения не имеют аналитического решения, поэтому необходимо использование численных методов;

4) для сфероидных композитных частиц необходимо усреднение $\mathbf{A}_{p,i}$ с учетом функции распределения ориентаций, поскольку поляризационный тензор \mathbf{P}_r для сфероидной формы включения зависит от пространственной ориентации.

Усредненный тензор концентрации деформаций

В общем случае усредненный тензор концентрации деформаций для сфероидных включений, учитывающий функцию распределения ориентаций, можно представить в следующем виде [24]:

$$\langle \mathbf{A}_r \rangle = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi p(\theta, \phi) [\mathbf{I} + \tilde{\mathbf{P}}_r(\theta, \phi) : (\mathbf{C}_r - \mathbf{C}_0)]^{-1} \times \sin \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi p(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}, \quad (11)$$

где $\langle \mathbf{A}_r \rangle$ — усредненный тензор концентрации деформаций 4-го ранга r -й фазы; $p(\theta, \phi)$ — функция распределения ориентаций (англ. — Orientation Distribution Function), описывающая вероятность определенной ориентации сфероидов в пространстве; $\tilde{\mathbf{P}}_r(\theta, \phi)$ — поляризационный тензор 4-го ранга в сферической системе координат; ϕ и θ — азимутальный и полярный угол в сферической системе координат.

Для случайного распределения (также называемого изотропным) сфероидных включений в композите, при котором $p(\theta, \phi) = 1$, получают уравнение для $\langle \mathbf{A}_r \rangle$:

$$\langle \mathbf{A}_r \rangle = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi [\mathbf{I} + \tilde{\mathbf{P}}_r(\theta, \phi) : (\mathbf{C}_r - \mathbf{C}_0)]^{-1} \times \sin \theta d\theta d\phi. \quad (12)$$

Преобразование компонент тензора \mathbf{P}_r осуществляют по следующей стандартной схеме:

$$(\tilde{\mathbf{P}}_r)_{ijkl} = r_{im} r_{jn} r_{kp} r_{lq} (P_r)_{mnpq}, \quad (13)$$

где $r_{\alpha\beta}$ — элементы матрицы поворота, $\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \\ \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \sin \phi & -\sin \theta \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \end{pmatrix}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим численный расчет эффективных жесткостных характеристик бетона в рамках предлагаемого подхода. Для расчета необходимо задать значения жесткостных характеристик цементного камня, который, как отмечено было ранее, является композиционным материалом, поэтому для их определения так-

же применяют методы гомогенизации. В рассматриваемом примере использованы данные моделирования эффективных жесткостных характеристик цементного камня при $V/C = 0,4$ и степени гидратации вяжущего 0,8 (что примерно соответствует возрасту 28 сут), взятые из работ [2, 25].

Состав бетона: цемент — 425 кг, вода — 170 кг, песок кварцевый — 725 кг, щебень гранитный — 1150 кг, $V/C = 0,4$. Плотность компонентов: цемент — 3150 кг/м³, вода — 1000 кг/м³, песок — 2650 кг/м³, щебень — 2670 кг/м³.

Нормализованное объемное содержание компонентов в бетонном композите: цементный камень (цемент + вода) $c_{cm} = 0,288$, песок $c_{agg,f} = 0,2766$, щебень $c_{agg,c} = 0,4354$.

Жесткостные характеристики компонентов бетона:

1) цементный камень: модуль Юнга — 21 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,24 [3];

2) песок кварцевый: модуль Юнга — 70 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,07 [6];

3) щебень гранитный: модуль Юнга — 65 ГПа, коэффициент Пуассона — 0,15 [6];

4) интерфейсная транзитная зона: коэффициент соотношения жесткостных характеристик к характеристикам цементного камня — 0,5 [26].

Гранулометрические характеристики песка представлены в табл. 1, щебня — в табл. 2.

Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы в щебне принято равным 35 %. Тогда содержание зерен щебня, аппроксимируемых сферической формой и формой вытянутого и сплюснутого сфероиды, составит для фракции 5–10 мм соответственно $(1 - 0,35) \cdot 0,2669 = 0,1735$ и $0,5 \cdot 0,35 \cdot 0,2669 = 0,047$.

Коэффициент соотношения полуосей для вытянутого сфероиды $\rho = 3$, для сплюснутого сфероиды $\rho = 1/3$. Толщина интерфейсной транзитной зоны $\delta_{из} = 0,05$ мм [11].

Используя формулу (7), определяют объемную концентрацию зерен заполнителя i -й фракции в композитной частице. Так, например, для песка фракции 2,5–5 мм она составит:

$$f_{agg}^{(2,5..5)} = \left(\frac{0,5 \cdot D_{4,3}^{(2,5..5)}}{0,5 \cdot D_{4,3}^{(2,5..5)} + \delta_{из}} \right)^3 =$$

$$= \left(\frac{0,5 \cdot 3,65}{0,5 \cdot 3,65 + 0,05} \right)^3 = 0,9733. \quad (14)$$

Затем по формуле (10) устанавливают объемную концентрацию композитных частиц i -й фракции в бетоне (приведено для наглядности также для фракции 2,5–5 мм):

$$c_p^{(2,5..5)} = c_{agg,f} \cdot f_s^{(2,5..5)} \cdot \frac{1}{f_{agg}^{(2,5..5)}} =$$

$$= 0,2766 \cdot 0,2916 \cdot \frac{1}{0,9733} = 0,083. \quad (15)$$

Объемная концентрация, вычисленная для всех композитных частиц в бетоне, представлена в табл. 3.

Эффективные жесткостные характеристики сферических композитных частиц вычисляют по уравнениям (6), сфероидных — по уравнению (8). Для операций над тензорами 4-го ранга наиболее подходящим является их представление в ортонормированной матричной нотации Мандела (англ. — Mandel notation), что позволяет выполнить двойное скалярное произведение тензоров 4-го ранга посредством обычного матричного умножения. Для вычисления значений компонент тензора Эшелби существуют аналитические зависимости, приведенные в исследовании [27], которые получены на основе эллиптических интегралов.

Далее показан выборочный пример эффективных тензоров жесткости 4-го ранга сферических композитных частиц фракции 2,5–5 и 5–10 мм в нотации Мандела, компоненты которых определены из вы-

Табл. 1. Гранулометрические характеристики песка

Table 1. Particle size distribution of sand

Фракция, мм / Fraction, mm	0,16–0,315	0,16–0,63	0,63–1,25	1,25–2,5	2,5–5
Нормализованный частный остаток f_s , определенный из распределения Gates – Gaudin – Schuhman при $m = 0,3$ / The normalized residue on the sieve determined from the Gates – Gaudin – Schuhmann distribution at $m = 0,3$	0,1246	0,1566	0,1904	0,2368	0,2916
Средний диаметр $D_{4,3}$, мм / Mean diameter $D_{4,3}$, mm	0,2314	0,4599	0,9154	1,825	3,65

Табл. 2. Гранулометрические характеристики щебня

Table 2. Particle size distribution of crushed stone

Фракция, мм / Fraction, mm	5–10	10–20	20–40
Нормализованный частный остаток f_s , определенный из распределения Gates – Gaudin – Schuhman при $m = 0,3$ / The normalized residue on the sieve determined from the Gates – Gaudin – Schuhmann distribution at $m = 0,3$	0,2669	0,3286	0,4045
Средний диаметр $D_{4,3}$, мм / Mean diameter $D_{4,3}$, mm	7,3	14,6	29,2

Табл. 3. Объемная концентрация композитных частиц в бетоне

Table 3. Volumetric concentration of composite particles in concrete

Форма частицы Particle shape	Фракция, мм / Fraction, mm							
	0,16–0,315	0,16–0,63	0,63–1,25	1,25–2,5	2,5–5	5–10	10–20	20–40
Сферическая Spherical	0,062	0,059	0,0618	0,071	0,083	0,0771	0,094	0,1151
Вытянутый сфероид Prolate spheroid	–	–	–	–	–	0,0213	0,0256	0,0312
Сплюснутый сфероид Oblate spheroid	–	–	–	–	–	0,021	0,0255	0,0311

численных значений объемного модуля и модуля сдвига по уравнению (8) (в ГПа):

$$C_{p, sph}^{(2,5,5)} = \begin{bmatrix} 63,78 & 6,431 & 6,431 & 0 & 0 & 0 \\ 6,431 & 63,78 & 6,431 & 0 & 0 & 0 \\ 6,431 & 6,431 & 63,78 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 57,35 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 57,35 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 57,35 \end{bmatrix};$$

$$C_{p, sph}^{(5,10)} = \begin{bmatrix} 65,32 & 12,03 & 12,03 & 0 & 0 & 0 \\ 12,03 & 65,32 & 12,03 & 0 & 0 & 0 \\ 12,03 & 12,03 & 65,32 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 53,29 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 53,29 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 53,29 \end{bmatrix}.$$

Компоненты эффективного тензора жесткости 4-го ранга в нотации Мандела для композитных частиц фракции 5–10 мм в форме вытянутого ($C_{p, pro}^{(5,10)}$) и сплюснутого сфероида ($C_{p, obl}^{(5,10)}$) вычислены в следующем виде (в ГПа):

$$C_{p, pro}^{(5,10)} = \begin{bmatrix} 63,44 & 11,68 & 11,68 & 0 & 0 & 0 \\ 11,68 & 61,09 & 12,07 & 0 & 0 & 0 \\ 11,68 & 12,07 & 61,09 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 49,02 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 49,96 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 49,96 \end{bmatrix};$$

$$C_{p, obl}^{(5,10)} = \begin{bmatrix} 62,26 & 11,88 & 11,88 & 0 & 0 & 0 \\ 11,88 & 64,33 & 11,85 & 0 & 0 & 0 \\ 11,88 & 11,85 & 64,33 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 52,48 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 50,71 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 50,71 \end{bmatrix}.$$

Следует отметить, что в случае композитных частиц, имеющих форму вытянутого и сплюснутого сфероида, наблюдается трансверсальная анизотропия их эффективного тензора жесткости, обусловленная пространственной ориентацией сфероидного включения вдоль оси симметрии композитной частицы.

Эффективный тензор жесткости бетонного композита определяют по описанной ранее итерационной схеме в порядке от наименьшей к наибольшей

фракции, включающей для рассматриваемого примера 14 итераций. В рассматриваемом примере для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений (9) на каждой итерации использовался явный метод Рунге – Кутты 5(4)-го порядка по схеме Дорманда – Принса [28]. Для вычисления интегралов по поверхности единичной сферы применялись квадратурные формулы Лебедева². Необходимые объемные концентрации композитных частиц в бетоне для каждой итерации приведены в табл. 3. Начальными условиями для решения системы дифференциальных уравнений являются компоненты тензора жесткости 4-го ранга цементного камня, которые в нотации Мандела имеют следующий вид (в ГПа):

$$C_1^{eff} (c_p^{(0,16,0,315)} = 0) = C_{cm} = \begin{bmatrix} 24,75 & 7,816 & 7,816 & 0 & 0 & 0 \\ 7,816 & 24,75 & 7,816 & 0 & 0 & 0 \\ 7,816 & 7,816 & 24,75 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 16,94 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 16,94 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 16,94 \end{bmatrix}.$$

Эффективный тензор жесткости бетонного композита в нотации Мандела (C^{eff}) получен на 14-й итерации, ГПа:

$$C^{eff} = C_{14}^{eff} = \begin{bmatrix} 40,04 & 9,601 & 9,6 & 0 & 0 & 0 \\ 9,601 & 40,04 & 9,609 & 0 & 0 & 0 \\ 9,6 & 9,609 & 40,01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 30,37 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 30,35 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 30,41 \end{bmatrix},$$

из которого определяют эффективный модуль упругости бетона, равный 36,25 ГПа.

Данное значение модуля упругости можно сравнить с прогнозным значением, полученным по феноменологической модели, например одной из самых распространенных CEB-FIP MC 90 [29]:

² ACI 209.2R-08. Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete ACI Committee 209. 2008. 45 p.

$$E_c = 21,5 \cdot \sqrt[3]{\frac{f_{cm}}{10}}, \quad (16)$$

где f_{cm} — средняя прочность бетона на сжатие в возрасте 28 сут по результатам испытаний образцов цилиндров, МПа.

Ориентировочное значение прочности бетона на сжатие можно вычислить из зависимости, связывающей прочность бетона с его водоцементным отношением, известной как закон водоцементного отношения. В технической литературе встречается большое количество математических моделей этого закона, из которых выбрана модель, приведенная ниже:

$$f_{cm} = (0,23 \cdot f_a + 10) \cdot \frac{C}{B} - 8, \quad (17)$$

где f_a — активность цемента, МПа.

По данным исследования [25] активность цемента в возрасте 28 сут составила 64,8 МПа, что соответствует ориентировочной прочности бетона в возрасте 28 сут $f_{cm} = 54,26$ МПа.

В конечном итоге прогнозное значение модуля упругости составляет $E_c = 21,5 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,8 \cdot 54,26}{10}} = 35,07$ ГПа. В целом полученные результаты показывают приемлемое совпадение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представлен усовершенствованный научный подход к определению эффективных жесткостных характеристик бетонного композита, включающий следующие основные положения:

1. Геометрическую форму зерен крупного заполнителя рассматривают не только как сферическую,

но также в виде сплюснутого сфероида для пластинчатой (лещадной) формы зерен и вытянутого сфероида для игольчатой формы зерен.

2. Влияние интерфейсной транзитной зоны бетона учитывается посредством концепции композитной частицы заполнителя, состоящей из зерна заполнителя и располагаемой вокруг него концентрической оболочки из транзитной зоны. Для определения жесткостных характеристик сфероидных композитных частиц используют метод двойного включения аналитической гомогенизации.

3. С целью установления эффективных жесткостных характеристик бетонного композита предложен итерационный подход, основанный на последовательном определении жесткостных характеристик двухфазной композитной системы «цементная матрица – композитная частица i -й фракции» дифференциальным методом аналитической гомогенизации. Такой подход позволяет учитывать влияние композитных частиц разных фракций на напряженно-деформированное состояние бетонного композита независимо друг от друга.

Вместе с тем представленный усовершенствованный подход следует рассматривать как базовый, который необходимо развивать в следующих направлениях:

- внедрение модели несовершенного контакта (англ. — imperfect bound) на границе раздела зерен заполнителя и транзитной зоны, поскольку очевидно, что в реальной структуре бетона условия идеального контакта практически невыполнимы;
- исследование влияния дефектов структуры бетона, образующихся от собственных деформаций в условиях внутреннего ограничения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Nilsen A.U., Monteiro P.J.M. Concrete: A three phase material // Cement and Concrete Research. 1993. Vol. 23. Issue 1. Pp. 147–151. DOI: 10.1016/0008-8846(93)90145-y
2. Scrivener K.L., Crumbie A.K., Laugesen P. The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete // Interface Science. 2004. Vol. 12. Issue 4. Pp. 411–421. DOI: 10.1023/b:ints.000042339.92990.4c
3. Bernard O., Ulm F.-J., Lemarchand E. A multiscale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials // Cement and Concrete Research. 2003. Vol. 33. Issue 9. Pp. 1293–1309. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00039-5
4. Pichler C., Lackner R., Mang H.A. A multiscale micromechanics model for the autogenous-shrinkage deformation of early-age cement-based materials // Engineering Fracture Mechanics. 2007. Vol. 74. Issue 1–2. Pp. 34–58. DOI: 10.1016/j.engfractmech.2006.01.034
5. Shi C., Tu Q., Fan H., Li S. An interphase model for effective elastic properties of concrete composites // Journal of Micromechanics and Molecular Physics. 2016. Vol. 1. Issue 1. P. 1650005. DOI: 10.1142/S2424-913016500053
6. Lavergne F., Ben Fraj A., Bayane I., Barthélemy J.F. Estimating the mechanical properties of hydrating blended cementitious materials: An investigation based on micromechanics // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 104. Pp. 37–60. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.10.018
7. Lezgy-Nazargah M., Emamian S.A., Aghasizadeh E., Khani M. Predicting the mechanical properties of ordinary concrete and nano-silica concrete using micromechanical methods // Sādhanā. 2018. Vol. 43. Issue 12. DOI: 10.1007/s12046-018-0965-0. EDN PIIWMR.
8. Haile B.F., Jin D.W., Yang B., Park S., Lee H.K. Multi-level homogenization for the prediction of the mechanical properties of ultra-high-performance concrete //

Construction and Building Materials. 2019. Vol. 229. P. 116797. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116797

9. *Stefaniuk D., Niewiadomski P., Musiał M., Łydźba D.* Elastic properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles: Multiscale approach // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2019. Vol. 19. Issue 4. Pp. 1150–1162. DOI: 10.1016/j.acme.2019.06.006. EDN EQQVLN.

10. *Sharma M., Bishnoi S.* Influence of properties of interfacial transition zone on elastic modulus of concrete: Evidence from micromechanical modelling // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 246. P. 118381. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118381. EDN BCCLEV.

11. *Onifade I., Birgisson B.* Microstructural integrity characterization of cement-based construction materials // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 307. P. 125012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125012. EDN CQWZUK.

12. *Li Y., Liu Y., Wang R.* Evaluation of the elastic modulus of concrete based on indentation test and multi-scale homogenization method // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 43. P. 102758. DOI: 10.1016/j.job.2021.102758. EDN WGUTZB.

13. *Silva R.M.S.Da., Barboza A.Da.S.R.* Concrete modeling using micromechanical multiphase models and multiscale analysis // Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 2023. Vol. 16. Issue 5. DOI: 10.1590/S1983-41952023000500001. EDN DBYSRR.

14. *Zaoui A.* Continuum micromechanics: Survey // Journal of Engineering Mechanics. 2002. Vol. 128. Issue 8. Pp. 808–816. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:8(808)

15. *Dvorak G.* Micromechanics of Composite Materials // Solid Mechanics and Its Applications. 2013. DOI: 10.1007/978-94-007-4101-0

16. *Bennoura M., Aboutajedine A.* Predictive capabilities of micromechanical models for composite materials // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2016. Vol. 35. Issue 14. Pp. 1115–1125. DOI: 10.1177/0731-684416640365. EDN WPQLCD.

17. *Ogierman W.* Data-driven mean-field homogenization: Enhancing the accuracy of the Mori-Tanaka method // Composite Structures. 2025. Vol. 358. P. 118985. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.118985. EDN PGSIWB.

18. *Bayat H., Rastgo M., Mansouri Zadeh M., Ver-ecken H.* Particle size distribution models, their characteristics and fitting capability // Journal of Hydrology.

2015. Vol. 529. Issue 3. Pp. 872–889. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.08.067

19. *Garboczi E., Berryman J.* New Effective Medium Theory for the Diffusivity or Conductivity of a Multi-Scale Concrete Microstructure Model // Concrete Science and Engineering. 2000. Vol. 2. Pp. 88–96.

20. *Беломесова К.Ю., Павлова И.П.* Аналитическая модель расчета количества базальтовой фибры для получения дисперсно-армированного напрягающего бетона оптимальной структуры // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2023. № 1. С. 27–31. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-27-31. EDN PRGKBP.

21. *Christensen R.M.* A critical evaluation for a class of micro-mechanics models // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1990. Vol. 38. Issue 3. Pp. 379–404. DOI: 10.1016/0022-5096(90)90005-o

22. *Klusemann B., Svendsen B.* Homogenization methods for multi-phase elastic composites: Comparisons and benchmarks // Technische Mechanik. 2019. Vol. 30. Issue 4. Pp. 374–386.

23. *Chatzigeorgiou G., Meraghni F., Charalambakis N.* Multiscale Modeling Approaches for Composites. Amsterdam : Elsevier, 2022. 345 p. DOI: 10.1016/C2019-0-05214-4

24. *Boumiz A., Vernet C., Cohen Tenoudji F.* Mechanical properties of cement pastes and mortars at early ages // Advanced Cement Based Materials. 1996. Vol. 3. Issue 3–4. Pp. 94–106. DOI: 10.1016/S1065-7355(96)90042-5

25. *Ramesh G., Sotelino E.D., Chen W.F.* Effect of transition zone on elastic moduli of concrete materials // Cement and Concrete Research. 1996. Vol. 26. Issue 4. Pp. 611–622. DOI: 10.1016/0008-8846(96)00016-6

26. *Mura T.* Micromechanics of Defects in Solids // Mechanics of Elastic and Inelastic Solids. 1987. DOI: 10.1007/978-94-009-3489-4

27. *Dormand J.R., Prince P.J.* A family of embedded Runge-Kutta formulae // Journal of Computational and Applied Mathematics. 1980. Vol. 6. Issue 1. Pp. 19–26. DOI: 10.1016/0771-050X(80)90013-3

28. *Lebedev V.I., Laikov D.N.* A quadrature formula for the sphere of the 131st algebraic order of accuracy // Doklady Mathematics. 1999. Vol. 59. Issue 3. С. 477–481. EDN LPSYFV.

29. *Шалимо М.А.* Лабораторный практикум по технологии бетонных и железобетонных изделий. Минск : Вышэйшая школа, 1987. 196 с.

Поступила в редакцию 15 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 31 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Валентин Викторович Кравченко** — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; 224017, Республика Беларусь, г. Брест, ул. Московская, д. 267; vvkravchenko@g.bstu.by.

REFERENCES

1. Nilsen A.U., Monteiro P.J.M. Concrete: A three phase material. *Cement and Concrete Research*. 1993; 23(1):147-151. DOI: 10.1016/0008-8846(93)90145-y
2. Scrivener K.L., Crumbie A.K., Laugesen P. The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete. *Interface Science*. 2004; 12(4):411-421. DOI: 10.1023/b:ints.0000042339.92990.4c
3. Bernard O., Ulm F.-J., Lemarchand E. A multi-scale micromechanics-hydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials. *Cement and Concrete Research*. 2003; 33(9):1293-1309. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00039-5
4. Pichler C., Lackner R., Mang H.A. A multiscale micromechanics model for the autogenous-shrinkage deformation of early-age cement-based materials. *Engineering Fracture Mechanics*. 2007; 74(1-2):34-58. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2006.01.034
5. Shi C., Tu Q., Fan H., Li S. An interphase model for effective elastic properties of concrete composites. *Journal of Micromechanics and Molecular Physics*. 2016; 1(1):1650005. DOI: 10.1142/S2424913016500053
6. Lavergne F., Ben Fraj A., Bayane I., Barthélemy J.F. Estimating the mechanical properties of hydrating blended cementitious materials: An investigation based on micromechanics. *Cement and Concrete Research*. 2018; 104:37-60. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.10.018
7. Lezgy-Nazargah M., Emamian S.A., Aghasizadeh E., Khani M. Predicting the mechanical properties of ordinary concrete and nano-silica concrete using micromechanical methods. *Sādhanā*. 2018; 43(12). DOI: 10.1007/s12046-018-0965-0. EDN PIIWMR.
8. Haile B.F., Jin D.W., Yang B., Park S., Lee H.K. Multi-level homogenization for the prediction of the mechanical properties of ultra-high-performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2019; 229:116797. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116797
9. Stefaniuk D., Niewiadomski P., Musiał M., Łydzba D. Elastic properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles: Multiscale approach. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2019; 19(4):1150-1162. DOI: 10.1016/j.acme.2019.06.006. EDN EQQVLN.
10. Sharma M., Bishnoi S. Influence of properties of interfacial transition zone on elastic modulus of concrete: Evidence from micromechanical modelling. *Construction and Building Materials*. 2020; 246:118381. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118381. EDN BCCLEV.
11. Onifade I., Birgisson B. Microstructural integrity characterization of cement-based construction materials. *Construction and Building Materials*. 2021; 307:125012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125012. EDN CQWZUK.
12. Li Y., Liu Y., Wang R. Evaluation of the elastic modulus of concrete based on indentation test and multi-scale homogenization method. *Journal of Building Engineering*. 2021; 43:102758. DOI: 10.1016/j.job.2021.102758. EDN WGUTZB.
13. Silva R.M.S.Da., Barboza A.Da.S.R. Concrete modeling using micromechanical multiphase models and multiscale analysis. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2023; 16(5). DOI: 10.1590/S1983-41952023000500001. EDN DBYSRR.
14. Zaoui A. Continuum micromechanics: Survey. *Journal of Engineering Mechanics*. 2002; 128(8):808-816. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:8(808)
15. Dvorak G. Micromechanics of Composite Materials. *Solid Mechanics and Its Applications*. 2013. DOI: 10.1007/978-94-007-4101-0
16. Bennoura M., Aboutajeddine A. Predictive capabilities of micromechanical models for composite materials. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2016; 35(14):1115-1125. DOI: 10.1177/0731684416640365. EDN WPQLCD.
17. Ogierman W. Data-driven mean-field homogenization: Enhancing the accuracy of the Mori-Tanaka method. *Composite Structures*. 2025; 358:118985. DOI: 10.1016/j.compstruct.2025.118985. EDN PGSIWB.
18. Bayat H., Rastgo M., Mansouri Zadeh M., Vereecken H. Particle size distribution models, their characteristics and fitting capability. *Journal of Hydrology*. 2015; 529(3):872-889. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.08.067
19. Garboczi E., Berryman J. New Effective Medium Theory for the Diffusivity or Conductivity of a Multi-Scale Concrete Microstructure Model. *Concrete Science and Engineering*. 2000; 2:88-96.
20. Belamesava K., Paulava I. Analytical model for calculating the amount of basalt fiber to produce dispersion-reinforced concrete with an optimal structure. *Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences*. 2023; 1:27-31. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-33-1-27-31. EDN PRGKBP. (rus.).
21. Christensen R.M. A critical evaluation for a class of micro-mechanics models. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1990; 38(3):379-404. DOI: 10.1016/0022-5096(90)90005-o
22. Klusemann B., Svendsen B. Homogenization methods for multi-phase elastic composites: Comparisons and benchmarks. *Technische Mechanik*. 2019; 30(4): 374-386.
23. Chatzigeorgiou G., Meraghni F., Charalambakis N. *Multiscale Modeling Approaches for Composites*. Amsterdam, Elsevier, 2022; 345. DOI: 10.1016/C2019-0-05214-4
24. Boumiz A., Vernet C., Cohen Tenoudji F. Mechanical properties of cement pastes and mortars at early ages. *Advanced Cement Based Materials*. 1996; 3(3-4): 94-106. DOI: 10.1016/S1065-7355(96)90042-5
25. Ramesh G., Sotelino E.D., Chen W.F. Effect of transition zone on elastic moduli of concrete materials. *Cement and Concrete Research*. 1996; 26(4):611-622. DOI: 10.1016/0008-8846(96)00016-6

26. Mura T. Micromechanics of Defects in Solids. *Mechanics of Elastic and Inelastic Solids*. 1987. DOI: 10.1007/978-94-009-3489-4

27. Dormand J.R., Prince P.J. A family of embedded Runge-Kutta formulae. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1980; 6(1):19-26. DOI: 10.1016/0771-050X(80)90013-3

28. Lebedev V.I., Laikov D.N. A quadrature formula for the sphere of the 131st algebraic order of accuracy. *Doklady Mathematics*. 1999; 59(3):477-481. EDN LPSYFV.

29. Shalimo M.A. *Guide for the concrete and reinforced concrete technology*. Minsk, Higher School, 1987; 196. (rus.).

Received December 15, 2025.

Adopted in revised form on December 31, 2025.

Approved for publication on January 29, 2026.

BIONOTES: **Valentin V. Kravchenko** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Concrete and Building Materials Technology; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; vvkravchenko@g.bstu.by.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.54

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.763-771

Оптимизация составов коррозионно-стойких бетонов по виду и расходу добавок-модификаторов для условий Республики Бурунди

Килперик Ками, **Сергей Михайлович Усачев**, Наталья Анатольевна Белькова
Воронежский государственный технический университет (ВГТУ); г. Воронеж, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Приведены результаты исследования влияния вида и расхода добавок-пластификаторов на свойства мелкозернистого бетона, эксплуатируемого в условиях Республики Бурунди. Объект исследования — мелкозернистый бетон, предмет исследования — показатели качества бетонной смеси и затвердевшего бетона. Особенностью данных исследований является то, что были использованы сырьевые материалы Республики Бурунди.

Материалы и методы. В качестве сырьевых материалов использованы: цемент ЦЕМ II/В-П 32,5 М компании BUCESCO (Республика Бурунди), песок из р. Музази Республики Бурунди и добавки-пластификаторы разных производителей и различного вещественного состава.

Результаты. Установлено, что введение добавок пластифицирующего действия ГПМ-У и GLENIUM 323 MIX оказывает значительный водоредуцирующий эффект на цементную систему. При этом наблюдается и повышение качества затвердевшего цементного камня. Выявленные для цементного камня закономерности просматриваются и для мелкозернистого бетона: введение добавок-пластификаторов любого типа позволяет уплотнить структуру, снизить пористость и повысить прочность материала. При этом повышение плотности мелкозернистого бетона дает возможность обеспечить его меньшую проницаемость и соответственно устойчивость к воздействию агрессивных сред. Это особенно важно для условий эксплуатации конструкций, характерных для Республики Бурунди.

Выводы. В результате исследований можно сделать следующие выводы и рекомендации: оптимальные дозировки добавок (независимо от их типа) находятся в пределах 0,9–1,2% от массы цемента (исходя из величины водоредуцирующего эффекта). Добавки на основе поликарбоксилатных эфиров дают наибольший эффект как на чистом цементном камне, так и на мелкозернистом бетоне.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Бурунди, бетон, цемент, добавки-пластификаторы, водоредуцирующий эффект, прочность при сжатии, коррозионная стойкость

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллегам и анонимным рецензентам за время, затраченное на рассмотрение статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ками К., Усачев С.М., Белькова Н.А. Оптимизация составов коррозионно-стойких бетонов по виду и расходу добавок-модификаторов для условий Республики Бурунди // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 763–771. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.763-771

Автор, ответственный за переписку: Наталья Анатольевна Белькова, verlnata@mail.ru.

Optimization of corrosion-resistant compositions concrete by type and consumption of additive modifiers for the conditions of the Republic of Burundi

Chilperic Kami, **Sergey M. Usachev**, Natalia A. Belkova
Voronezh State Technical University (VSTU); Voronezh, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The results of a study on the influence of the type and dosage of plasticizing admixtures on the properties of fine-grained concrete operated under the conditions of the Republic of Burundi are presented. The object of the study is fine-grained concrete, while the subject of the study is the quality indicators of the concrete mix and hardened concrete. A distinctive feature of these studies is the use of raw materials sourced from the Republic of Burundi.

Materials and methods. The following raw materials were used: CEM II/V-P 32.5 M cement produced by BUCESCO (Republic of Burundi), sand from the Muzazi River in the Republic of Burundi, and plasticizing admixtures from different manufacturers with various chemical compositions.

Results. It was established that the incorporation of the plasticizing admixtures GPM-U and GLENIUM 323 MIX provides a significant water-reducing effect on the cement system. At the same time, an improvement in the quality of the hardened cement paste was observed. The patterns identified for the cement paste were also observed for fine-grained concrete: the incorporation of plasticizing admixtures of any type makes it possible to densify the structure, reduce porosity, and in-

crease the strength of the material. In turn, the increased density of fine-grained concrete ensures lower permeability and, consequently, greater resistance to aggressive environmental exposure. This is particularly important for the operating conditions characteristic of the Republic of Burundi.

Conclusions. As a result of the studies, the following conclusions and recommendations can be made: the optimal dosages of additives (regardless of their type) are within 0.9–1.2 % of the mass of cement (based on the value of the water-reducing effect). At the same time, additives based on polycarboxylate ethers give the greatest effect both on pure cement stone and on fine-grained concrete.

KEYWORDS: Burundi, concrete, cement, plasticizing additives, water-reducing effect, compressive strength, corrosion resistance

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the editorial board and anonymous reviewers for their time spent reviewing the article.

FOR CITATION: Kami K., Usachev S.M., Belkova N.A. Optimization of corrosion-resistant compositions concrete by type and consumption of additive modifiers for the conditions of the Republic of Burundi. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):763-771. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.763-771 (rus.).

Corresponding author: Natalya A. Belkova, verlnata@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Бетон является материалом, обладающим значительным спектром свойств, и функционирует в широком диапазоне агрессивных сред в течение длительного периода эксплуатации. Коррозионная стойкость служит одной из важнейших характеристик для качественного бетона. Затвердевшая цементная матрица бетона в очень ограниченной степени растворима в воде, это означает, что некоторые компоненты со временем будут постепенно вымываться с поверхности бетона [1, 2]. Коррозия цементных бетонов и конструкций из них наносит существенный вред экономике любой страны.

Если рассматривать особенности эксплуатации бетонов в условиях Республики Бурунди, то конструкции здесь эксплуатируются в довольно сложных климатических условиях: происходит постоянное изменение уровня воды из-за круглогодичной смены дождливого и сухого сезонов. Также имеются и температурные колебания (от 16 до 27 °C) при относительной влажности воздуха, близкой к 100 %¹ [3]. При этом вода как эксплуатационная среда содержит умеренное количество растворенных солей, водородный показатель pH составляет 8,5–9, щелочность среды — 2,5–2,8, содержание электролитов — 156–158 мг/л. Воды рек Республики Бурунди по отношению к бетону классифицируются как нейтральные и слабощелочные.

Таким образом, для рассматриваемых условий эксплуатации возможно проявление следующих видов коррозии цементного камня: коррозия выщелачивания; углекислотная коррозия с образованием легкорастворимых соединений; сульфатная или сульфатоалюминатная коррозия с накоплением и кристаллизацией с увеличением объема малорастворимых продуктов [4].

Согласно исследованиям [5–11], повышение долговечности цементных бетонов может быть достигнуто двумя методами: правильным выбором типа цемента и заполнителей и применением хими-

чески активных модификаторов (химических и минеральных), которые взаимодействуют с цементной матрицей, уплотняют ее и уменьшают проводимость материала для агрессивных компонентов внешней среды. К таким модификаторам относятся, в частности, добавки супер- и гиперпластификаторы, которые позволяют снижать водоцементное отношение (В/Ц), повышать плотность и прочность бетона и, как следствие, его коррозионную стойкость [12, 13]. Эффективность добавок зависит от их вещественного состава [14] и дозировки, а также минералогического состава цемента [15–17]. В большинстве трудов [6, 7, 12, 13] в качестве объекта выступали системы (камень, бетон) на основе цементов классов ЦЕМ I (т.е. без активных минеральных добавок в составе клинкера). Установлено [15, 16], что даже относительно незначительные колебания в минералогическом составе цементного клинкера вызывают изменения как величины оптимальных дозировок добавок, так и свойств затвердевшего материала. Введение минерального компонента в цементный клинкер приводит к изменениям как характеристик бетона [7, 11], так и свежеприготовленной смеси при остальных одинаковых условиях. Поэтому проблема оптимизации составов цементного бетона (для конкретных сырьевых материалов) по типу и расходу добавок актуальна.

В соответствии с предыдущими работами авторов [18–20] разработаны составы бетонов и выполнены комплексные исследования структуры и свойств бетонов в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации в Бурунди. Необходимо отметить, что в качестве вяжущего материала в данных составах применялся цемент с пуццолановой добавкой, который обладает повышенными значениями водопотребности и показателями усадки и набухания. Все это отрицательно сказывается на показателях коррозионной стойкости в частности и долговечности в целом.

Цель исследования — оптимизация составов мелкозернистого бетона на цементах, содержащих минеральный активный компонент, по виду и количеству добавок-пластификаторов.

¹ Бурунди // Труды Института Африки. 2019. Т. 23.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве сырьевых материалов использованы: цемент ЦЕМ II/ В-П 32,5 М компании «BUCECO» (Республика Бурунди), песок из р. Музази Республики Бурунди.

Указанный цемент характеризуется повышенным содержанием алюмината кальция C_3A (до 9,0%), карбоната кальция $CaCO_3$ (до 9,1%) и гидросульфата кальция $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$ (до 8,2%). При этом сумма силикатов кальция составляет порядка 67–68%. Нормальная плотность цементного теста — 31,5% [18].

Песок имеет сложный химический состав: содержание кварца не превышает 94,0%, остальное — примеси в виде полевого шпата (до 5,2%) и других минералов. Песок представлен фракцией от 0,16 до 5,0 мм, модуль крупности — 2,98. Для данного заполнителя характерно повышенное содержание пылевидных и глинистых частиц — до 8,2%.

В качестве добавок использованы: ПФМ-НЛК (группа нафталинсульфонатов), производитель ООО «Полипласт»; Зикамент ФФ (группа меламинсульфонатов), производитель Группа компаний Sika; GLENIUM 323 MIX, производитель ООО «БАСФ Строительные системы»; ГПМ-У (группа поликарбоксилатных эфиров) производитель ЗАО «НП ЦМИД».

Исследования выполнялись в три этапа. На первом этапе в качестве модельной системы выступало цементное тесто нормальной плотности. В качестве критерия оптимизации применили показатель водоредуцирующего эффекта в зависимости от расхода добавок-пластификаторов в соответствии с ГОСТ 30459–2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности». Дозировка добавок принята согласно рекомендациям производителей в пределах 0,6–1,2% от массы цемента. В/Ц отношение эталонной смеси (цементного теста без добавок) составило 0,32.

На втором этапе проводились исследования свойств и структуры цементного камня, модифицированного добавками-пластификаторами при их оптимальной дозировке. Подвижность смеси соответствовала нормальной плотности цементного теста (при различных значениях В/Ц отношения). Микроструктура цементного камня оценивалась с помощью метода сканирующей электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп Phenom XL).

На третьем этапе проводилась оптимизация состава мелкозернистого бетона по виду добавки-пластификатора. Исследования осуществлялись на мелкозернистом бетоне состава Ц:П = 1:3, подвижностью по осадке конуса ОК = 2–4 см. Образцы твердели в нормальных условиях в течение 28 сут.

Средняя плотность определялась в соответствии с требованиями ГОСТ 12730.1–2020 «Бетоны. Методы определения плотности»; пористость — по ГОСТ 12730.4–2020. «Бетоны. Методы определения параметров пористости»; предел прочности при сжатии — по ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы

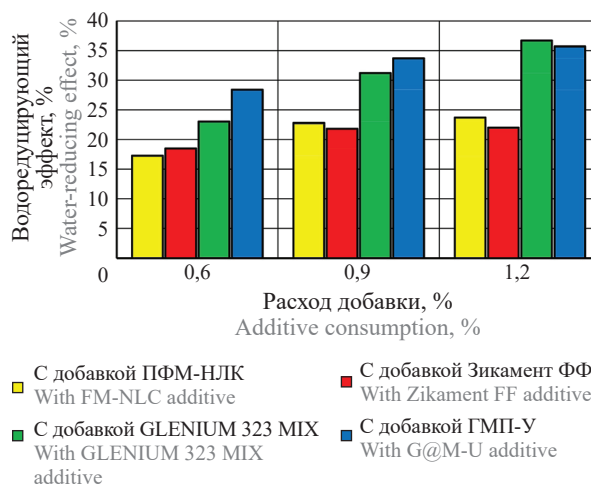


Рис. 1. Зависимость величины водоредуцирующего эффекта от вида и расхода добавки-пластификатора

Fig. 1. The dependence of the water-reducing effect on the type and dosage of the plasticizer additive

определения прочности по контрольным образцам». Прочностные характеристики систем устанавливались на электромеханической испытательной системе INSTRON 5982 с автоматической обработкой данных в Bluehill Elements.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлены результаты определения величины водоредуцирующего эффекта выбранных добавок в зависимости от их дозировки. Выявлено, что наибольшим водоредуцирующим эффектом обладают добавки ГПМ-У и GLENIUM 323 MIX на основе поликарбоксилатных эфиров. Это объясняется механизмом действия добавок на основе поликарбоксилатных эфиров, которому присущ стерический эффект. Для добавки ГПМ-У оптимальной является дозировка 0,9% от массы цемента. Повышение дозировки с 0,6 до 0,9% приводит к повышению величины водоредуцирующего эффекта на 15–18% (с 28,4 до 33,7%). Дальнейшее повышение расхода до 1,2% практически не влияет на величину водоредуцирующего эффекта (он увеличивается с 33,7 до 35,6%, т.е. всего на 5%). Это можно объяснить повышением концентрации молекул добавки в растворе и достижением точки критической концентрации мицеллообразования.

Для добавки GLENIUM 323 MIX наблюдается несколько иная картина: при повышении ее расхода с 0,6 до 0,9% величина водоредуцирующего эффекта изменяется с 23 до 31,2% (т.е. примерно на 30–35%), при дальнейшем увеличении расхода добавки эта разница составляет более 15% (величина водоредуцирующего эффекта повышается с 31,2 до 36,7%). То есть применение добавки ГПМ-У более экономически выгодно.

Что касается остальных добавок, для них так же характерен оптимум при дозировке добавки

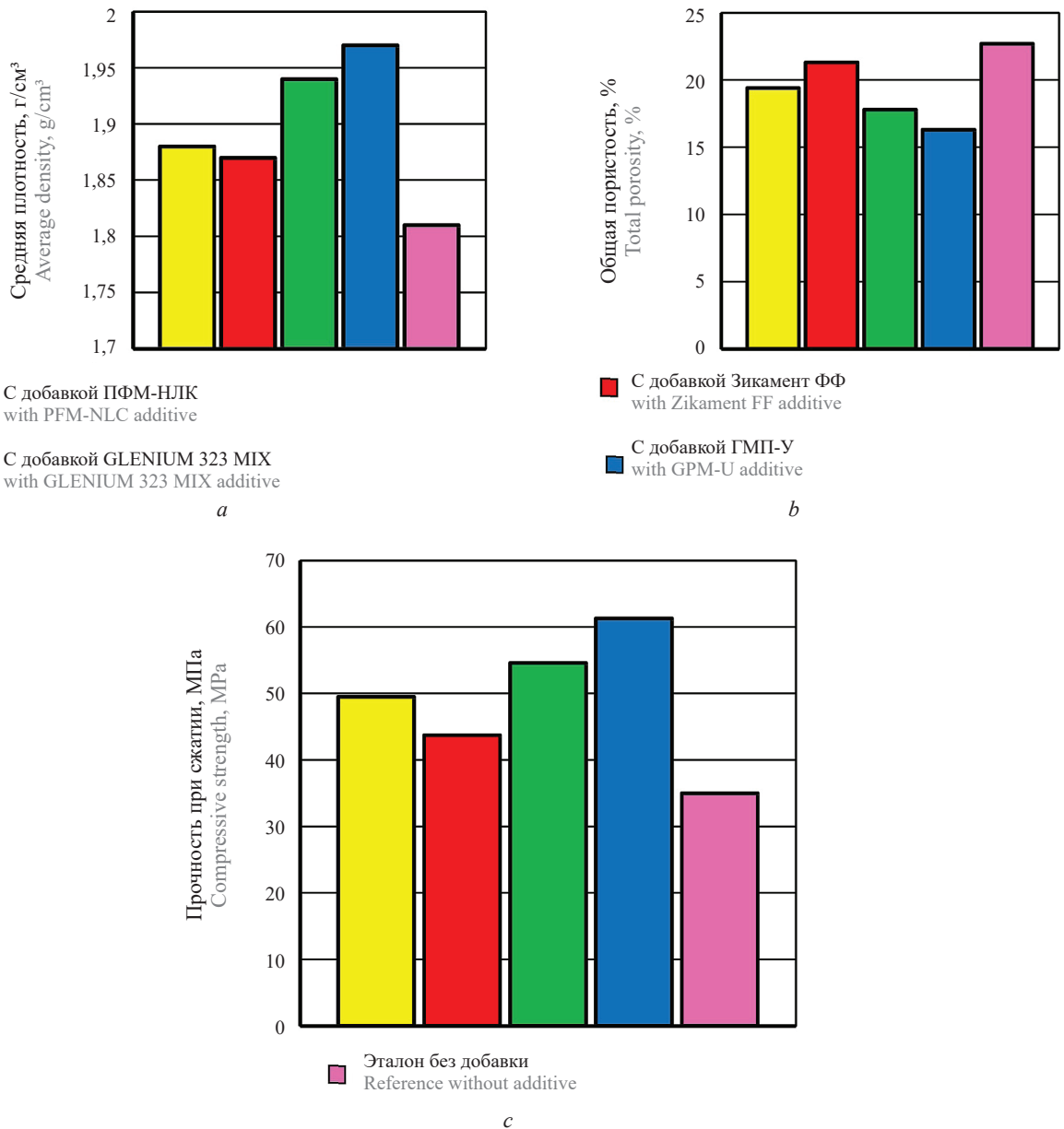


Рис. 2. Зависимость свойств и структуры цементного камня от вида добавки-пластификатора: а — средней плотности; б — общей пористости; с — прочности при сжатии

Fig. 2. The dependence of the properties and structure of cement stone on the type of plasticizer additive: a — average density; b — total porosity; c — compressive strength

0,9 % при относительно низком водоредуцирующем эффекте (от 16 до 22 %). Это можно объяснить иным механизмом действия (относительно добавок на поликарбоксилатных эфирах).

В целом проведенные исследования позволили установить, что для цементов с минеральными активными добавками характерны те же эффекты, как и в цементных без добавок. Но эффективность действия добавок-пластификаторов в данном случае несколько ниже. Так, согласно исследованию [17], величина водоредуцирующего эффекта для цемента класса ЦЕМ I различных производителей с добавками-пластификаторами на основе нафталинсульфонатов при оптимальных их дозировках колеблется в пределах 27–40%,

а для изучаемого цемента класса ЦЕМ II/В-II она находится в пределах 17–24 %. Это можно объяснить действием пуццоланового компонента цемента, который повышает его водопотребность.

Установлено, что оптимальной дозировкой добавок является значение 0,9% от массы цемента, именно этот расход был принят для дальнейших исследований показателей свойств цементного камня и бетона.

На рис. 2 представлены результаты исследования свойств цементного камня как основного матричного материала при дозировке добавок 0,9 % от массы цемента.

По полученным данным видно, что введение добавок-пластификаторов повышает плотность

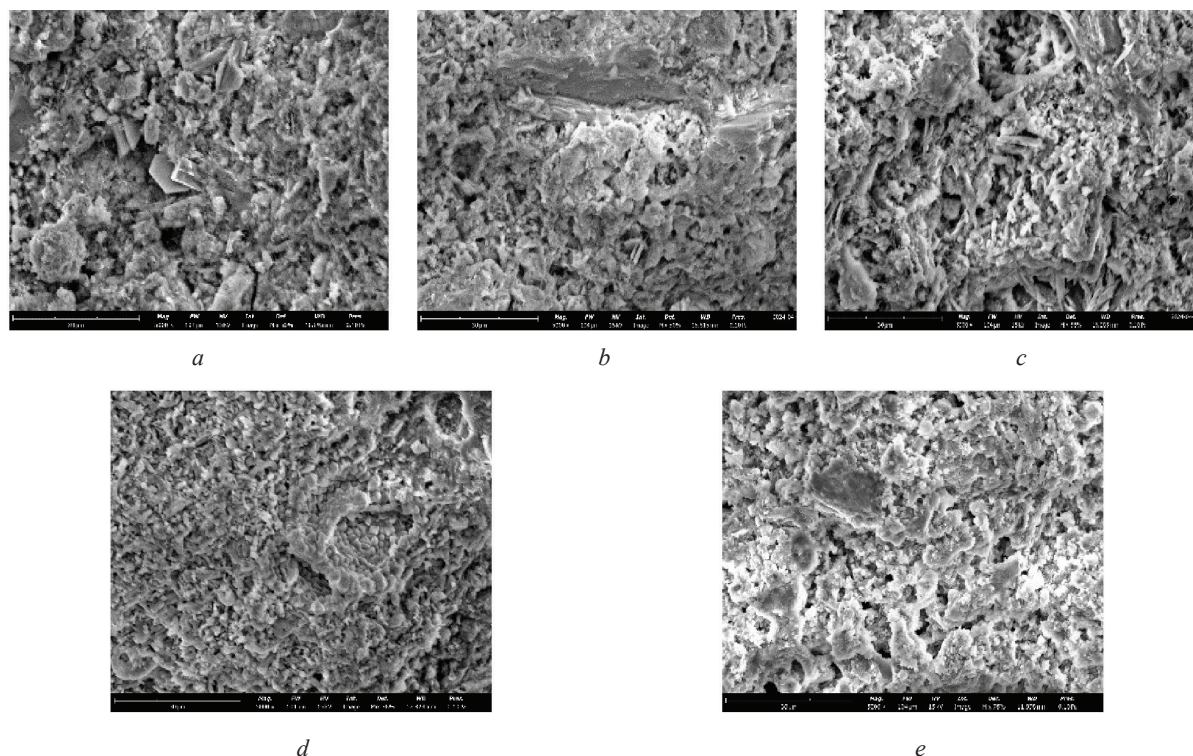


Рис. 3. Микроструктурные особенности цементного камня: *a* — эталон (без добавок); *b* — с добавкой Зикамент ФФ; *c* — с добавкой ПФМ-НЛК; *d* — с добавкой ГМП-У; *e* — с добавкой GLENIUM 323 MIX

Fig. 3. Microstructural features of cement stone: *a* — standard (without additives); *b* — with addition of Zikament FF; *c* — with PFM-NLC additive; *d* — with GMP-U additive; *e* — with GLENIUM 323 MIX additive

(с 1,81 до 1,97 г/см³) и соответственно снижает общую пористость цементного камня (с 22 до 16,3 %). При этом максимальные значения плотности получены для системы с добавками на основе поликарбоксилатов (ГМП-У и GLENIUM 323 MIX), что находится в корреляции с величиной водоредуцирующего эффекта. Все это дает предпосылки к прогнозированию повышения прочности и коррозионной стойкости цементного камня. Так, повышение прочности цементного камня для этих систем составляет 50–75 % (с 35,2 МПа для эталона до 54–61 МПа для систем с добавками).

Если сравнивать сведения, полученные для этих двух добавок, то наблюдается большая эффективность добавки ГМП-У: прочность цементного камня составила 61 МПа по сравнению с 54 МПа для цементного камня с добавкой GLENIUM 323 MIX. Это можно трактовать так, что добавка ГМП-У — комплексная и, помимо пластифицирующего компонента, содержит компонент, регулирующий процессы твердения бетонных смесей. Все это нашло свое отражение в более эффективном ее действии даже на цементе, содержащем пуццолоновый компонент.

Для систем с двумя другими добавками так же отмечается улучшение качества цементного камня: плотность повышается с 1,81 до 1,87 г/см³ при минимальном снижении пористости до 19–21 %. Прочность цементного камня с добавкой ПФМ-НЛК составила 49,5 МПа, что выше эталона примерно на 40 %, для системы с добавкой Зикамент ФФ — около 22 %.

Это так же можно интерпретировать особенностями состава добавки ПФМ-НЛК, которая содержит пластифицирующий, воздухововлекающий и гидрофобизирующий компоненты, которые уплотняют структуру.

В целом можно сказать, что введение добавок-пластификаторов значительно улучшает качественные характеристики цементного камня и компенсирует действие пуццолоновой составляющей в цементном клинкере, что отражено в изменениях микроструктуры цементного камня (рис. 3).

Микроструктура немодифицированного добавками цементного камня представлена в виде неоднородной аморфно-кристаллической массы с кристаллитами различного размера и типа (в том числе и кристаллов портландита Ca(OH)₂) и видимой пористостью. При введении в цементную систему добавок ПФМ-НЛК и Зикамент ФФ микроструктура уплотняется, в ней практически отсутствуют крупные кристаллы портландита (рис. 3, *b*, *c*), структура представлена мелкокристаллической фазой гидросиликатов кальция и отдельными игольчатыми кристаллами этtringита.

Цементный камень, модифицированный добавками на основе поликарбоксилатных эфиров (рис. 3, *d*, *e*), характеризуется большим числом устойчивых гидратных высокоосновных гидросиликатов кальция различного состава в виде гелеобразной массы, состоящей из мелких кристаллов, которые форми-

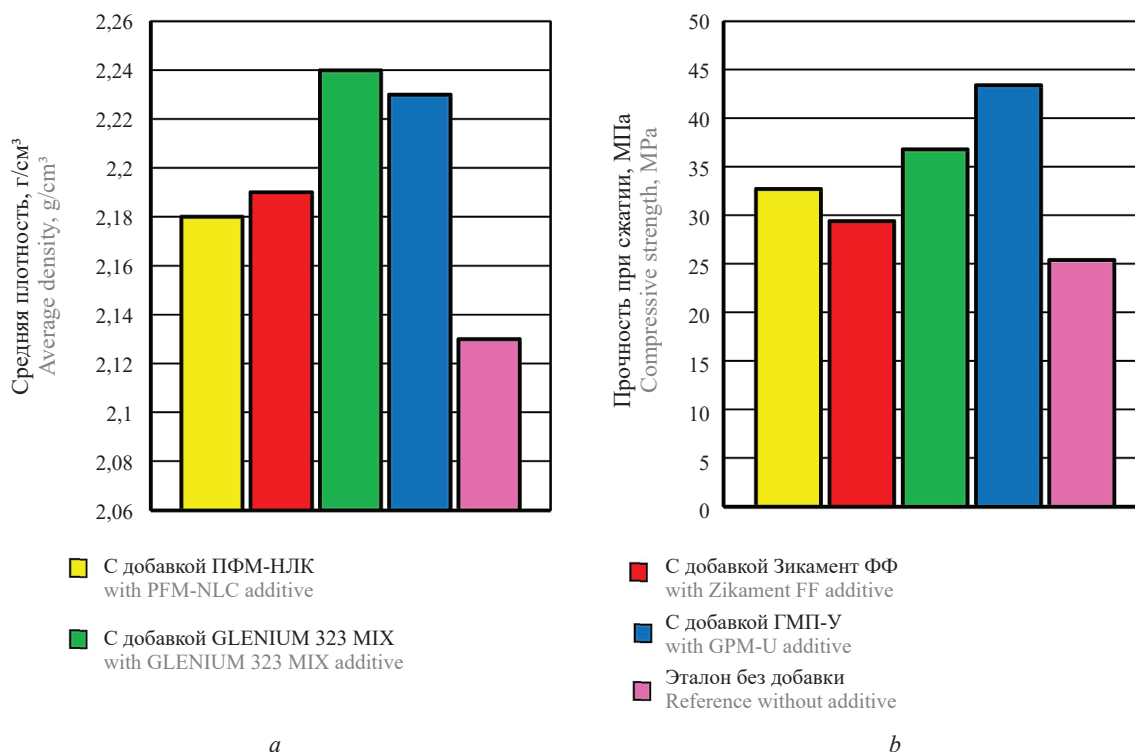


Рис. 4. Зависимость свойств мелкозернистого бетона от вида добавки-пластификатора: *a* — средней плотности; *b* — прочности при сжатии

Fig. 4. The dependence of the properties of fine-grained concrete on the type of plasticiser additive: *a* — average density; *b* — compressive strength

руют плотную стабильную структуру, что и нашло отражение в высоких прочностных свойствах.

Далее проводились исследования влияния вида добавок на свойства мелкозернистого бетона при оптимальной дозировке для равноподвижных смесей.

Для мелкозернистого бетона так же прослеживаются полученные для цементного камня зависимости (рис. 4): наибольшие значения плотности и прочности получены для бетона с добавкой ГПМ-У (прочность при сжатии бетона с добавкой составила 43,4 МПа по сравнению с 25,4 МПа для эталона, т.е. практически в два раза) при относительно значительном повышении плотности бетона (с 2,13 до 2,23 г/см³).

Для бетона с добавкой GLENIUM 323 MIX характерны меньшие (по сравнению с бетоном с добавкой ГПМ-У) прочности: 36,8 МПа (что примерно на 40 % выше, чем у эталона). То есть опять прослеживается более эффективное действие комплексной добавки ГПМ-У.

При этом, согласно исследованию [17], для цементных систем с добавками такого типа (на основе поликарбоксилатных эфиров) характерны и пониженные значения влажностной усадки, что положительно скажется на стойкости материала в засушливые периоды эксплуатации.

Для добавок на основе меламинасульфонатов и нафталинсульфонатов так же наблюдается некоторое улучшение качества материала (рис. 4). Однако

в данном случае повышение прочности составляет 15–30 % (с 25,4 до 29,4–32,8 МПа) при относительно небольшом увеличении значения плотности (на 50–70 кг/м³). Повышение плотности мелкозернистого бетона позволяет обеспечить его меньшую проницаемость и, соответственно, устойчивость к воздействию агрессивных сред. Это особенно важно для условий эксплуатации конструкций, характерных для Республики Бурунди.

В целом можно сказать, что выбранный технологический прием улучшения качества цементных бетонов путем модифицирования их добавками пластифицирующего действия оказался эффективным применительно к использованным в исследовании сырьевым материалам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Введение добавок-пластификаторов улучшает качественные характеристики как цементного камня, так и мелкозернистого бетона, что является предпосылкой получения бетонов с заданными показателями коррозионной стойкости на цементе, производимом компанией BUCESO (Республика Бурунди), и местном мелком заполнителе.

В зависимости от параметров эксплуатационной среды и свойств конструкции можно рекомендовать следующее применение добавок-пластификаторов:

1. Добавки на основе поликарбоксилатных эфиров — для бетонов и конструкций с повышенными качественными характеристиками (прочностью, трещиностойкостью, надежностью и т.п.), эксплуатируемых в достаточно длительных условиях повышенной или пониженной влажности или в условиях попеременного насыщения водой и высушивания (градиент влажности от 0 до 100 %).

2. Добавки на основе меламинасульфонатов и нафталинсульфонатов — для рядовых бетонов и конструкций из них, которые применяются в сухих

условиях или при переменном увлажнении и высушивании (градиент влажности от 50 до 100 %).

3. Оптимальные дозировки добавок-пластификаторов независимо от их типа находятся в пределах 0,6–0,9 % от массы цемента (для использованных в исследовании сырьевых материалов).

Также были определены направления для дальнейших исследований, которые будут касаться разработки составов модифицированного добавками тяжелого бетона и оценки его стойкости в различных условиях эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н. Обоснование методов испытаний коррозионной стойкости материалов гидратационного твердения // Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека : II Междунар. онлайн-конгресс, посвящ. 30-летию кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. 2019. С. 735–739. EDN OAUUVD.

2. Трофимов Б.Я., Шулдяков К.В., Махмудов А.М. Влияние на долговечность бетона микроструктуры гидратных фаз цементного камня // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. № 3. С. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-3-8-18. EDN UCUSLU.

3. Mikerego E., Niyonzima N., Ntirampeba J.C. Impact of impurities of local construction materials on the bearing capacity of the concrete used in structures in Burundi // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 10. С. 1357–1362. DOI: 10.22227/1997-0935. 2021.10.1357-1362. EDN DZANPX.

4. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М. : Стройиздат, 1980. 536 с.

5. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Хахалева Е.Н., Толыпин Д.А. Оптимизация процесса выбора типа цемента для изделий, эксплуатирующихся в агрессивных средах // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 3. С. 18–23. DOI: 10.12737/article_5abfc9b8581017.80464211. EDN YVAQFS.

6. Гончаров Ю.И., Рахимбаев Ш.М., Малькова М.Ю., Иванов А.С., Терсенова Л.А., Морозова А.Ю. Коррозионно-стойкие мелкозернистые шлакобетоны // Строительные материалы. 2004. № 6. С. 38–39. EDN IBENZD.

7. Osei D.Y., Jackson E.N. Compressive strength and workability of concrete using natural pozzolana as partial replacement of ordinary Portland cement // Advances in Applied Science Research. 2012. Vol. 3. Issue 6. Pp. 3658–3662.

8. Yuan Q., Liu Z., Zheng K., Ma C. Portland cement concrete // Civil Engineering Materials. 2021. Pp. 59–204. DOI: 10.1016/b978-0-12-822865-4.00003-9

9. Lei L., Hirata T., Plank J. 40 years of PCE superplasticizers — History, current state-of-the-art and an outlook // Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 157. P. 106826. DOI: 10.1016/j.cemconres. 2022.106826. EDN OEEPTF.

10. Тараканов О.В. Формирование микроструктуры цементных материалов с минеральными и комплексными добавками // Технология бетонов. 2009. № 7–8. С. 58–60.

11. Ekolu S.O., Hooton R.D., Thomas M.D.A. Studies on Ugandan Volcanic ash and Tuff // Proceedings from the International Conference on Advances in Engineering and Technology. 2006. Pp. 75–83. DOI: 10.1016/B978-008045312-5/50009-1

12. Colorado H.A., Muñoz A., Neves Monteiro S. Circular economy of construction and demolition waste: a case study of Colombia // Sustainability. 2022. Vol. 14. Issue 12. P. 7225. DOI: 10.3390/su14127225. EDN VXHVFG.

13. Dahlbo H., Bachér J., Lähtinen K., Jouttijärvi T., Suoheimo P., Mattila T. et al. Construction and demolition waste management — a holistic evaluation of environmental performance // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 107. Pp. 333–341. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.073

14. Макушина Ю.В. К вопросу об идентификации добавок-пластификаторов для бетонов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 2 (51). С. 90–96. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-2/90-96. EDN SXZNGF.

15. Борисов А.А., Калашиников В.И., Ащеулов П.В. Классификация реакционной активности цементов в присутствии суперпластификаторов // Строительные материалы. 2002. № 1. С. 10–12. EDN IBEDLN.

16. Белькова Н.А., Литвинова А.С., Супрунчик Г.Г. Исследование влияния вида цемента на эффективность действия добавок-пластификаторов //

Химия, физика и механика материалов. 2019. № 4 (23). С. 33–45. EDN PУCRPA.

17. Зоткин А.Г. Прочностная совместимость цемента с суперпластификаторами // Технологии бетонов. 2014. № 9 (98). С. 22–26. EDN TBGACV.

18. Усачев С.М., Кукина О.Б., Ками К. Исследование свойств сырьевых материалов для бетонов в Республике Бурунди // Научный журнал строительства и архитектуры. 2023. № 1 (69). С. 36–46. DOI: 10.36622/VSTU.2023.69.1.003. EDN DWSVNT.

19. Усачев С.М., Ками К. Изменение структуры и свойств бетонов в различных условиях эксплуата-

ции (на примере Республики Бурунди) // Научный журнал строительства и архитектуры. 2024. № 2 (74). С. 58–67. DOI: 10.36622/2541-7592.2024.74.2.005. EDN DSTCCQ.

20. Шмитько Е.И., Макушина Ю.В., Белькова Н.А., Милохин И.В. Влажностная усадка бетона: влияние состава и структуры применяемых пластифицирующих добавок // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 1 (42). С. 128–135. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-1-13. EDN AXOXUL.

Поступила в редакцию 12 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 15 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 13 февраля 2026 г.

Об авторах: **Килперик Ками** — аспирант кафедры технологий строительных материалов, изделий и конструкций; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**; 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; ResearcherID: PMF-7732-2026, ORCID: 0009-0001-5384-6187; kchilperic1@gmail.com;

Сергей Михайлович Усачев — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологий строительных материалов, изделий и конструкций; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**; 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; РИНЦ ID: 620342, ResearcherID: W-9416-2018, ORCID: 0000-0002-3856-187X; sergey.usa4ev@mail.ru;

Наталья Анатольевна Белькова — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий строительных материалов, изделий и конструкций; **Воронежский государственный технический университет (ВГТУ)**; 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84; РИНЦ ID: 608015, ResearcherID: V-8765-2018, ORCID: 0000-0002-3005-5956; verlnata@mail.ru.

Вклад авторов:

Ками К. — проведение экспериментальных исследований, обработка материала, написание статьи.

Усачев С.М. — общее научное руководство, концепция исследования.

Белькова Н.А. — научное руководство, анализ данных, написание статьи, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Посвящается светлой памяти коллеги и учителя Сергея Михайловича Усачева.

REFERENCES

1. Rakhimbaev Sh.M., Tolykina N.M., Khakhaeva E.N. Substantiation of test methods for corrosion resistance of hydration hardening materials. *Nature-like technologies of building composites for human habitat protection : II International online congress dedicated to the 30th anniversary of the Department of Building Materials Science, Products and Structures*. 2019; 735-739. EDN OAUUVD. (rus.).

2. Trofimov B., Shuldyakov K., Mahmudov A. Influence of microstructure of hydrate phases of cement stone on concrete durability. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2021; 3:8-18. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-3-8-18. EDN UCUSLU. (rus.).

3. Mikerego E., Niyonzima N., Ntirampeba J.C. Impact of impurities of local construction materials on the bearing capacity of the concrete used in structures in Burundi. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(10):1357-1362. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.10.1357-1362. EDN DZANPX.

4. Moskvina V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzeev E.A. *Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection*. Moscow, Stroyizdat, 1980; 536. (rus.).

5. Rakhimbayev Sh.M., Tolykina N.M., Khakhaeva E.N., Tolykina D.A. Optimization of the process of choosing the type of cement for products operated in aggressive media. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2018; 3:18-23. DOI: 10.12737/article_5abfc9b8581017.80464211. EDN YVAQFS. (rus.).

6. Goncharov Yu.I., Rakhimbaev Sh.M., Malkova M.Yu., Ivanov A.S., Tersenova L.A., Morozova A.Yu. Corrosion-resistant fine-grained slag concrete. *Construction Materials*. 2004; 6:38-39. EDN IBENZD. (rus.).

7. Osei D.Y., Jackson E.N. Compressive strength and workability of concrete using natural pozzolana as partial replacement of ordinary Portland cement. *Advances in Applied Science Research*. 2012; 3(6):3658-3662.

8. Yuan Q., Liu Z., Zheng K., Ma C. Portland cement concrete. *Civil Engineering Materials*. 2021; 59-204. DOI: 10.1016/b978-0-12-822865-4.00003-9
9. Lei L., Hirata T., Plank J. 40 years of PCE superplasticizers — History, current state-of-the-art and an outlook. *Cement and Concrete Research*. 2022; 157:106826. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106826. EDN OEEPTF.
10. Tarakanov O.V. Formation of the microstructure of cement materials with mineral and complex additives. *Concrete technology*. 2009; 7-8:58-60. (rus.).
11. Ekolu S.O., Hooton R.D., Thomas M.D.A. Studies on Ugandan Volcanic ash and Tuff. *Proceedings from the International Conference on Advances in Engineering and Technology*. 2006; 75-83. DOI: 10.1016/B978-008045312-5/50009-1
12. Colorado H.A., Muñoz A., Neves Monteiro S. Circular economy of construction and demolition waste: a case study of Colombia. *Sustainability*. 2022; 14(12):7225. DOI: 10.3390/su14127225. EDN VXHVFG.
13. Dahlbo H., Bachér J., Lähtinen K., Jouttijärvi T., Suoheimo P., Mattila T. et al. Construction and demolition waste management — a holistic evaluation of environmental performance. *Journal of Cleaner Production*. 2015; 107:333-341. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.02.073
14. Makushina Ju.V. Identification of plasticizer-additives for concrete. *FEFU School of Engineering Bulletin*. 2022; 2(51):90-96. DOI: 10.24866/2227-6858/2022-2/90-96. EDN SXZNGF. (rus.).
15. Borisov A.A., Kalashnikov V.I., Ashcheulov P.V. Classification of the reactive activity of cements in the presence of superplasticizers. *Construction Materials*. 2002; 1:10-12. EDN IBEDLH. (rus.).
16. Belkova N.A., Litvinova A.S., Suprunchik G.G. Study of impact of cement type on efficiency of plasticizer additives. *Chemistry, Physics and Mechanics of Materials*. 2019; 4(23):33-45. EDN PYCRPA. (rus.).
17. Zotkin A.G. Strength compatibility of cements with superplasticizers. *Concrete Technologies*. 2014; 9(98):22-26. EDN TBGACV. (rus.).
18. Usachev S.M., Kukina O.B., Kami K. Exploration of the properties of raw materials for concrete in the Republic of Burundi. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023; 1(69):36-46. DOI: 10.36622/VSTU.2023.69.1.003. EDN DWSVNT. (rus.).
19. Usachev S.M., Kami K. Changes in the structure and properties of concretes in different operating conditions (by the example of the republic of Burundi). *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2024; 2(74):58-67. DOI: 10.36622/2541-7592.2024.74.2.005. EDN DCTCCQ. (rus.).
20. Shmitko E., Makushina Ju., Belkova N., Milokhin I. Moist shrinkage of concrete: influence of composition and structure of the applied plasticizing additives. *FEFU School of Engineering Bulletin*. 2020; 1(42):128-135. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-1-13. EDN AXOXUL. (rus.).

Received October 12, 2025.

Adopted in revised form on October 15, 2025.

Approved for publication on February 13, 2026.

BIONOTES: **Chilperic Kami** — postgraduate student of the Department of Technologies of Building Materials, Products and Structures; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 84 20th Anniversary of October st., Voronezh, 394006, Russian Federation; ResearcherID: PMF-7732-2026, ORCID: 0009-0001-5384-6187; kchilperic1@gmail.com;

Sergey M. Usachev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technologies of Building Materials, Products and Structures; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 84 20th Anniversary of October st., Voronezh, 394006, Russian Federation; ID RSCI: 620342, ResearcherID: W-9416-2018, ORCID: 0000-0002-3856-187X; sergey.usa4ev@mail.ru;

Natalia A. Belkova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technologies of Building Materials, Products and Structures; **Voronezh State Technical University (VSTU)**; 84 20th Anniversary of October st., Voronezh, 394006, Russian Federation; ID RSCI: 608015, ResearcherID: V-8765-2018, ORCID: 0000-0002-3005-5956; verlnata@mail.ru.

Contribution of the authors:

Chilperic Kami — experimental research, material processing writing the article.

Sergey M. Usachev — general scientific guidance, research concept.

Natalia A. Belkova — scientific guidance, data analysis, writing article, final findings.

The authors declare no conflict of interest.

Dedicated to the blessed memory of a colleague and teacher Sergey Mikhailovich Usachev.

Морфология микродефектов в асфальтобетонах на ранней стадии эксплуатационной деградации

Николай Игоревич Шестаков, Владимир Артурович Дзуцев,
Иван Романович Полев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Эксплуатационная долговечность асфальтобетонных покрытий в значительной степени определяется процессами деградации микроструктуры материала под воздействием воды и переменных температур. На ранних стадиях разрушения формируются микродефекты, которые впоследствии приводят к развитию трещинообразования и снижению эксплуатационных характеристик покрытия. Несмотря на большое количество исследований, посвященных долговечности асфальтобетонов, морфологические признаки начальной стадии эксплуатационной деградации изучены недостаточно. Цель исследования — выявление ранних морфологических признаков повреждения структуры асфальтобетона и количественная оценка изменения дефектного пространства материала на начальной стадии эксплуатационного разрушения.

Материалы и методы. Объектом исследования являются образцы щебеночно-мастичного асфальтобетона ЩМА-16. Микроскопическая съемка зон с выраженными микродефектами выполнена для образцов в исходном состоянии и после водонасыщения с последующим циклическим замораживанием и оттаиванием. Морфологический анализ дефектного пространства проводился по цифровым микрофотографиям с помощью методов автоматизированной обработки изображений. Для количественной характеристики структуры дефектов использован комплекс морфологических показателей, включающий долю дефектной области, а также параметры, характеризующие форму и протяженность границ дефектов.

Результаты. Проанализировано 40 характерных зон микроструктуры. Получены количественные оценки изменения дефектности после воздействия воды и переменных температурных циклов. Установлено, что уже после пяти циклов замораживания и оттаивания формируются устойчивые признаки первичной деградации структуры, проявляющиеся в увеличении интегральной дефектности и изменении порово-трещинной морфологии. Определено, что на ранней стадии деградации одновременно реализуются механизмы разветвления дефектной сети и объединения дефектных областей с их укрупнением.

Выводы. Полученные результаты подтверждают возможность диагностики ранних стадий эксплуатационного повреждения асфальтобетона на основе морфологического анализа микроструктуры. Показана необходимость совместного использования площадных и линейных морфологических показателей при количественной оценке дефектного пространства материала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асфальтобетон, битум, асфальтобетонное покрытие, эксплуатационная деградация, микродефекты, поры, микропустоты, микротрещины, морфология, микроструктура, цифровая микроскопия, водонасыщение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шестаков Н.И., Дзуцев В.А., Полев И.Р. Морфология микродефектов в асфальтобетонах на ранней стадии эксплуатационной деградации // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 772–780. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.772-780

Автор, ответственный за переписку: Владимир Артурович Дзуцев, vdzucev699@gmail.com.

Morphology of microdefects in asphalt concrete at the early stage of operational degradation

Nikolay I. Shestakov, Vladimir A. Dzutsev, Ivan R. Polev

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

ABSTRACT

Introduction. The operational durability of asphalt concrete pavements is largely determined by degradation processes occurring in the microstructure of the material under the influence of moisture and alternating temperatures. At the early stages of deterioration, microdefects are formed, which subsequently lead to crack development and a decrease in the performance characteristics of the pavement. Despite numerous studies devoted to the durability of asphalt concrete, the morphological features of the initial stage of operational degradation remain insufficiently studied. The aim of this work is to identify early morphological indicators of damage in the asphalt concrete structure and to quantitatively assess changes in the defect space of the material at the initial stage of operational deterioration.

Materials and methods. The object of the study is stone mastic asphalt SMA-16 specimens. Microscopic imaging of areas with pronounced microdefects was performed for specimens in the initial condition and after water saturation followed by cyclic freezing and thawing. The morphology of the defect space was analyzed using digital microphotographs with automated image processing methods. A set of morphological parameters was used to quantitatively characterize the defect structure, including the fraction of the defective area and parameters describing the shape and extent of defect boundaries.

Results. A total of 40 representative microstructural zones were analyzed. Quantitative estimates of defect evolution after exposure to water and alternating temperature cycles were obtained. It was established that stable features of primary structural degradation appear after five freeze–thaw cycles, manifested by an increase in integral defectiveness and changes in pore–crack morphology. It is shown that at the early stage of degradation, mechanisms of defect network branching and merging of defect regions with their enlargement occur simultaneously.

Conclusions. The obtained results confirm the possibility of diagnosing the early stages of operational damage in asphalt concrete based on morphological analysis of its microstructure. The necessity of combined use of areal and linear morphological parameters for quantitative assessment of the defect space is demonstrated.

KEYWORDS: asphalt concrete, bitumen, asphalt concrete pavement, operational degradation, microdefects, pores, microvoids, microcracks, morphology, microstructure, digital microscopy, water saturation

FOR CITATION: Shestakov N.I., Dzutsev V.A., Polev I.R. Morphology of microdefects in asphalt concrete at the early stage of operational degradation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):772-780. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.772-780 (rus.).

Corresponding author: Vladimir A. Dzutsev, vdzucev699@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Асфальтобетон является многофазным дисперсно-наполненным композиционным материалом, эксплуатационные свойства которого устанавливаются не только гранулометрией и объемными показателями, но и внутренней структурой. Чаще всего в рамках структурного подхода асфальтобетон рассматривается как иерархическая система, где пространственная организация минерального скелета, вяжущего и межфазных зон определяет формирование прочностных связей и устойчивость материала к деградации под действием внешних факторов [1–4].

Контакт «минеральное зерно – битумная пленка» следует анализировать как ключевую зону создания структурной устойчивости асфальтобетона, поскольку именно здесь задаются условия адгезивно-когезионного взаимодействия и реализуются механизмы зарождения микродефектов. Совокупность исследований [5, 6], посвященных модели строения битумной пленки на минеральных зернах, управлению структурообразованием композитов через регулирование состояния поверхности дисперсного сырья, влиянию механоактивации минеральных порошков на взаимодействие с битумом, а также формированию адсорбционно-сольватных слоев в межфазной зоне, показывает, что изменение физико-химического состояния поверхности и межфазных слоев приводит к вариации сплошности и устойчивости битумной пленки, что, в свою очередь, обуславливает склонность материала к развитию дефектности и накоплению микроповрежденности при эксплуатационных воздействиях [7, 8].

На уровне минерального компонента морфология микродефектов определяется не только объемным содержанием наполнителя, но и его дисперсностью, пористостью и поверхностной активностью, поскольку именно эти параметры задают характер упаковки частиц, степень заполнения межзернового пространства и условия образования межфазной зоны. Известно, что изменение состояния минераль-

ного наполнителя приводит к вариации свойств материалов на его основе и отражается на закономерностях структурообразования, включая параметры дефектного пространства [9]. Использование пористых дисперсных наполнителей дополнительно усложняет картину, потому что влияет на распределение микропустот и может изменять как локальную концентрацию связующего, так и пути проникновения влаги в структуру [10]. В свою очередь, применение модифицирующих добавок, в том числе наномодификаторов, рассматривается как инструмент направленного изменения структурного состояния дорожных композитов и повышения эксплуатационных характеристик, однако эффект таких решений во многом реализуется через трансформацию морфологии дефектов и межфазных зон [11–13]. С этих позиций технологические подходы, ориентированные на получение асфальтобетонных плотной структуры с улучшенными показателями, можно трактовать как практическую реализацию стратегии снижения структурной дефектности, т.е. ограничения размеров, связности и развития микродефектов на уровне матрицы и контактов компонентов [14].

Структуру асфальтобетона целесообразно исследовать как нестационарную систему, параметры которой складываются на технологической стадии и продолжают изменяться в эксплуатации, определяя траекторию накопления поврежденности. На этапе укладки и уплотнения условия доуплотнения и изменения физико-механических характеристик свежеуложенного материала влияют на степень формирования минерального скелета, распределение связующего и, как следствие, на исходные параметры дефектного пространства, которое в дальнейшем выступает «матрицей» для развития микроповреждений [15]. В процессе эксплуатации фиксируются изменения состава, структуры и текстуры асфальтобетона, сопровождающиеся перераспределением компонентов и ростом микроповрежденности, что проявляется в эволюции порово-трещинной морфологии и увеличении связно-

сти дефектов [16]. С этих позиций результаты работ, где повышение усталостной долговечности связывается с комплексной модификацией структуры, можно интерпретировать как подтверждение принципа управляемости деградации: направленное изменение структурных характеристик снижает интенсивность зарождения и развития микродефектов и замедляет переход к критическим стадиям поврежденности [17]. Дополнительную методическую основу для таких сопоставлений дает систематизация разновидностей двухкомпонентных структур асфальтобетона по особенностям структурообразования, позволяющая соотносить наблюдаемую морфологию дефектов с типом структурной организации материала [18].

Несмотря на значительный объем исследований, посвященных структуре и модификации асфальтобетона, в настоящее время сохраняется методический разрыв между качественным описанием микроструктуры и количественной оценкой морфологии микродефектов как диагностического признака, дающего возможность сопоставлять материалы и объяснять механизмы деградации. В качестве ответа на эту проблему в последние годы активно развиваются инструментальные и расчетные подходы к структурному анализу: от методов визуализации и формализованного морфологического описания компонентов дорожных материалов до средств трехмерного исследования внутренней структуры и порового пространства, включая рентгеновскую компьютерную томографию, а также трехмерные модели, связывающие особенности микроструктуры с влагомеханическим откликом и учитывающие неоднородность структуры на основе локально-однородных представлений и вариативности распределения заполнителя [19–22].

Таким образом, анализ морфологии микродефектов асфальтобетона следует рассматривать не как вспомогательное описание структуры, а как инструмент выявления причинно-следственных связей между формированием материала и последующей деградацией в эксплуатации. При этом принципиальное значение имеют именно первичные изменения структуры, возникающие на ранних стадиях воздействия: они образуют исходную конфигурацию дефектного пространства (поры, микропустоты, трещиноподобные нарушения, зоны ослабленного контакта), которая далее определяет направления проникновения влаги, локализацию напряжений и скорость накопления микроповрежденности. Иными словами, начальные структурные нарушения выступают «точками запуска» процессов снижения ресурса и утраты долговечности, а их количественная фиксация позволяет перейти от констатации факта разрушения к диагностике механизма его зарождения и раннего развития.

Цель настоящего исследования — количественная оценка первичных изменений морфологии микродефектов асфальтобетона при воздействии влаги и циклического замораживания – оттаивания на ос-

нове микроскопии и автоматизированного анализа изображений. Для достижения цели проводится сопоставление структурных состояний материала в исходном состоянии и после заданного числа циклов с выделением параметров, наиболее чувствительных к раннему развитию дефектного пространства, включая долю дефектной области, характеристики распределения и укрупнения дефектов, а также показатели, отражающие усложнение и рост связности границ дефектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования использован щебеночно-мастичный асфальтобетон ЩМА-16 как один из наиболее распространенных типов смесей для верхних слоев покрытий. Состав материала принят типовым для ЩМА-16: минеральный остов на щебне фракции до 16 мм (ГОСТ 32703, ГОСТ 33029), минеральный порошок МП-1 (ГОСТ 32761), а также полимер-модифицированное битумное вяжущее ПБВ 60 (ГОСТ Р 52056) и стабилизирующее волокно на основе целлюлозы (ГОСТ Р 58406.1 п. 5.4.5). Для выбранного типа асфальтобетона характерны развитая контактная структура минерального скелета и наличие битумной составляющей, что делает материал чувствительным к локальным дефектам межфазной зоны и эволюции порово-трещинного пространства при попеременном замораживании – оттаивании.

Из исходного материала изготовлены стандартные образцы (по ГОСТ Р 58406.1, ГОСТ Р 58406.9, ГОСТ Р 58401.24), после чего выполнено распиливание с получением пластин. Распил осуществлялся с подачей воды, что позволяло минимизировать локальный нагрев, исключить размягчение вяжущего и сохранить исходную морфологию микродефектов без дополнительного деформирования структуры. Толщина пластин принималась 15 мм.

Всего подготовлено 8 образцов. На поверхности каждого образца предварительным визуальным осмотром выделяли участки с наибольшей выраженностью дефектов (поры, микропустоты, локальные нарушения битума и межфазной зоны, трещиноподобные разрывы). Суммарно сформирована выборка из 40 зон, по которым проведено сопоставление морфологии в состояниях «до замораживания» и «после 5 циклов». Выделенные зоны маркировали и фиксировали их положение в привязке к характерным ориентирующим признакам (крупные зерна, границы, сочетание дефектов) в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1.

Для регистрации морфологии дефектов применялся оптический цифровой микроскоп. Съемка выполнялась при увеличениях 50×, 100× и 200× (в зависимости от характерного масштаба дефектов в зоне). Разрешение изображений обеспечивало пространственное разрешение 5–10 мкм/пикс. С целью обеспечения сопоставимости результатов до и после воздействия для каждой зоны сохранялись одина-

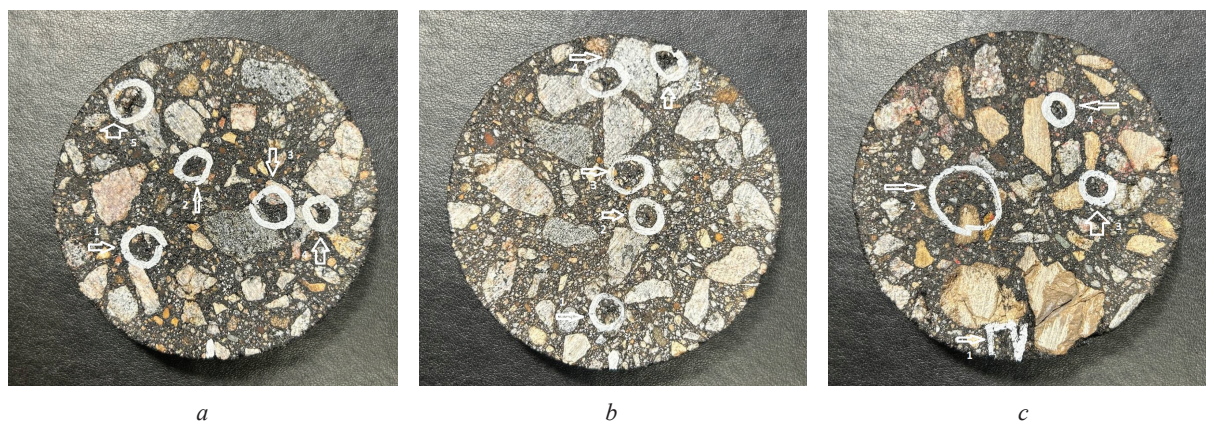


Рис. 1. Поверхности образцов асфальтобетона с выделением участков рассмотрения

Fig. 1. Surfaces of asphalt concrete specimens with selected observation areas

ковые параметры съемки (увеличение, поле зрения, фокусировка, освещение) и выполнялась повторная фиксация тех же участков по заранее осуществленной привязке (маркировка и ориентиры).

После первичной фиксации микроструктуры образцы подвергали длительному насыщению в воде до стабилизации массы (контроль производился по изменению массы при последовательных взвешиваниях). Далее проводили циклическое замораживание – оттаивание в водной среде по следующему режиму: замораживание 12 ч при температуре 8 ± 1 °С; оттаивание 12 ч в воде при температуре 20 ± 2 °С.

Общее число циклов составляло 5. Выбор пяти циклов обоснован задачей исследования первичной стадии деградации: на этом интервале, как правило, проявляются ранние структурные изменения (инициация микротрещин, раскрытие существующих микропустот, локальная перестройка межфазной зоны и рост связности дефектного пространства), при этом еще не доминируют грубые макроповреждения, способные маскировать механизм зарождения дефектов и затруднять сопоставление одних и тех же зон. Таким образом, 5 циклов являются достаточными для выявления начальной фазы образования и развития микродефектов и корректного сравнения морфологии в состояниях «до» и «после» воздействия.

По завершении пяти циклов образцы извлекали, затем сушили до постоянной массы. После сушки осуществляли повторный визуальный осмотр и повторную микроскопическую фиксацию тех же зон, которые были зарегистрированы до воздействия, с сохранением условий съемки и геометрической привязки. Полученные изображения использовались для сравнительного анализа изменений морфологии микродефектов в пределах каждой зоны и обобщения закономерностей развития дефектного пространства по совокупности образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Морфологический анализ выполнен в постановке парного сравнения «до – после» для одних и тех же

зон дефектности, что позволяет интерпретировать наблюдаемые изменения как результат заданного циклического воздействия, а не межобразцовой вариативности. Проанализировано 40 зон с выраженными микродефектами на образцах асфальтобетона после водонасыщения и циклического замораживания – оттаивания. На рис. 2, а показаны зоны 1–4 в исходном состоянии (до замораживания), на рис. 2, б представлены те же зоны после пяти циклов замораживания – оттаивания. Визуальное сопоставление рис. 2, а и рис. 2, б демонстрирует характерные признаки начальной стадии деградации: усиление выраженности дефектных границ, появление новых разрывов и локальное укрупнение дефектных областей, что отражает развитие микроповрежденности в порово-трещинном пространстве.

Для перехода от визуального анализа к сопоставимым численным характеристикам использован набор морфологических показателей, разделяющих вклад дефектов порового типа и дефектов трещиноподобного типа.

Площадная дефектность определялась как доля дефектной области в поле зрения:

$$D_S = \frac{S_{\text{деф}}}{S_{\text{общ}}},$$

где $S_{\text{деф}}$ — суммарная площадь дефектных областей (поры и пустоты, выделенные по разметке); $S_{\text{общ}}$ — площадь анализируемого поля зрения. Рост D_S интерпретируется как увеличение доли дефектного пространства и/или укрупнение дефектов.

Линейная дефектность оценивалась через плотность границ дефектов:

$$D_L = \frac{L_{\text{деф}}}{S_{\text{общ}}},$$

где $L_{\text{деф}}$ — суммарная протяженность границ дефектов. Показатель D_L наиболее чувствителен к развитию трещиноподобных дефектов и усложнению их конфигурации (разветвление, изрезанность, рост связности), что особенно важно для ранней стадии

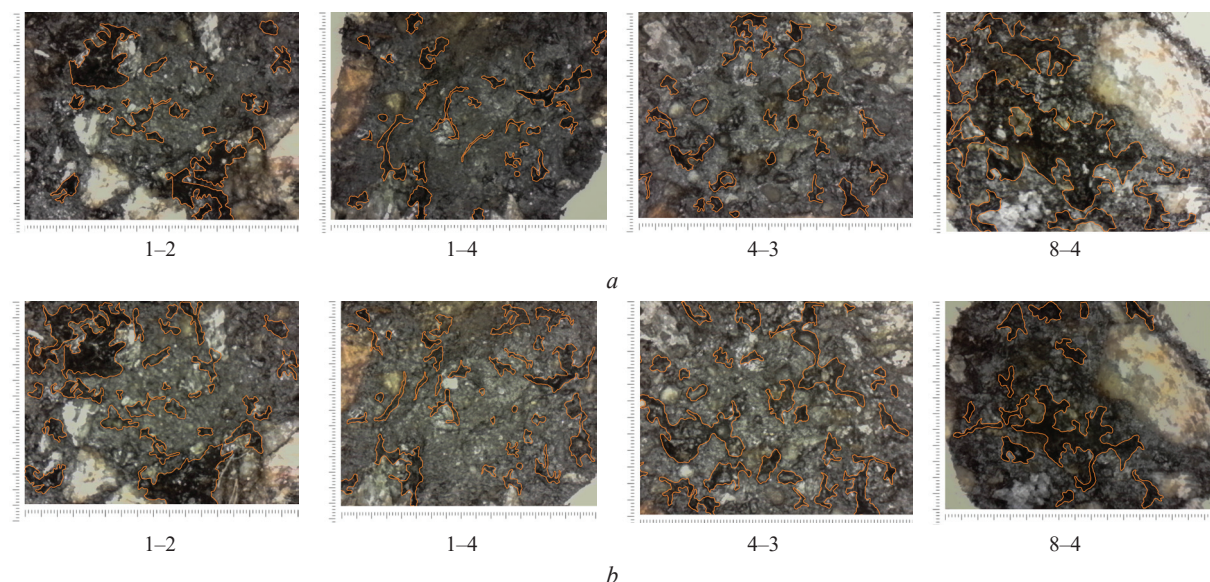


Рис. 2. Микрофотографии зон 1–4 с разметкой микродефектов: *a* — в исходном состоянии (до замораживания); *b* — после пяти циклов замораживания – оттаивания

Fig. 2. Micrographs of zones 1–4 with marked microdefects: *a* — in the initial state (before freezing); *b* — after five freeze – thaw cycles

деградации, когда изменения проявляются прежде всего по границам.

Дополнительно использованы показатели фрагментации и объединения: число дефектов N (по связанным компонентам) и индекс доминирования крупнейшего дефекта:

$$K = \frac{S_{\max}}{\sum S_i},$$

где S_{\max} — площадь крупнейшего дефекта в зоне; $\sum S_i$ — суммарная площадь всех дефектов. Совместная интерпретация N (число связанных дефектов или показатель фрагментации) и K позволяет различать сценарии «инициация и разветвление» и «слияние с укрупнением».

В табл. 1 приведены средние значения указанных параметров и их разброс для состояния до замораживания и после пяти циклов замораживания – оттаивания, а также среднее приращение показателей, позволяющее оценить направленность и интенсивность первичных структурных изменений.

На уровне всей совокупности зон (табл. 1) после пяти циклов фиксируется рост интегральной дефектности: среднее значение D_s увеличивается с 8,09 до 9,30 %, а D_L возрастает с 6,14 до 7,04 %. Увеличение D_s трактуется как раскрытие существующих микропустот и вовлечение дополнительных участков структуры в дефектное пространство, тогда как рост D_L отражает развитие дефектов по границам, усложнение и разветвление контуров, т.е. формирование трещиноподобной составляющей микроповрежденности. При этом показатели фрагментации и объединения демонстрируют разнонаправленные тенденции: среднее число дефектов N в целом уве-

личивается (с 131,6 до 142,9), но доля зон с ростом N составляет 45 %, что указывает на конкурирующие сценарии развития дефектов. Индекс K в среднем изменяется незначительно, что согласуется с тем, что на ранней стадии одновременно присутствуют и разветвление, и локальное объединение дефектов.

Поскольку развитие дефектного пространства зависит от исходного структурного состояния и локальной неоднородности материала, наряду с интегральным усреднением целесообразно рассмотреть вариативность изменений на уровне отдельных образцов. Такой подход дает возможность выявить доминирующий морфологический сценарий: преимущественное разветвление дефектной сети с ростом площадных и линейных характеристик либо объединение с перераспределением дефектов в более крупные области. В табл. 2 представлены усредненные по зонам значения D_s и D_L для каждого образца в состояниях до и после пяти циклов, а также соответствующие приращения, характеризующие индивидуальную динамику дефектности в пределах каждого образца.

Разброс изменений по образцам, представленный в табл. 2, подтверждает неоднородность морфологических сценариев и позволяет связать наблюдаемые особенности с механизмами первичной деградации. Так, для образцов 1–4 фиксируется наиболее выраженный рост дефектности: D_s увеличивается на 3,44–6,72 %, а D_L на 2,26–4,69 %, что соответствует сценарию «инициация и развитие дефектной сети» с активным формированием новых границ и расширением дефектных областей. Образцы 5–6 демонстрируют умеренный рост D_s на 1,22–3,39 % и D_L на 1,69–2,40 %, что характерно для замедленной первичной эволюции дефектов

Табл. 1. Сводные показатели по всем зонам ($n = 40$)Table 1. Summary indicators for all zones ($n = 40$)

Показатель Parameter	До замораживания, среднее \pm SD* Before freezing, mean \pm SD*	После пяти циклов, среднее \pm SD* After 5 cycles, mean \pm SD*	Изменение (после – до), среднее Change (after – before), mean
D_s , %	8,09 \pm 5,44	9,30 \pm 5,17	+1,22
D_L , %	6,14 \pm 4,22	7,04 \pm 3,78	+0,91
N , шт. / units	131,6 \pm 73,3	142,9 \pm 66,4	+11,2
K	0,276 \pm 0,158	0,267 \pm 0,181	-0,009

Примечание: приведены среднее значение и стандартное отклонение (SD) по совокупности зон, $n = 40$.

Note: The mean and standard deviation (SD) are given for the total number of zones, $n = 40$.

Табл. 2. Усреднение по образцам (образцы 1–8)

Table 2. Averaged values for the specimens (specimens 1–8)

Образец Specimen	Число зон Number of zones	D_s до, % D_s before, %	D_s после, % D_s after, %	ΔD_s , %	D_L до, % D_L before, %	D_L после, % D_L after, %	D_L , %
1	5	6,78	13,50	+6,72	5,31	9,38	+4,06
2	5	10,69	15,80	+5,11	8,19	11,40	+3,21
3	4	3,52	6,96	+3,44	3,08	5,34	+2,26
4	4	4,96	11,09	+6,14	3,97	8,66	+4,69
5	4	4,83	8,22	+3,39	4,13	6,54	+2,40
6	5	3,54	4,76	+1,22	2,53	4,22	+1,69
7	6	12,05	7,24	-4,81	9,13	5,51	-3,62
8	7	13,27	7,62	-5,65	9,40	5,94	-3,46

при меньшей интенсивности раскрытия пор и разветвления контуров. В то же время для образцов 7–8 наблюдается снижение как площадной, так и линейной дефектности ($\Delta D_s = -4,81$ и $-5,65$ %, $D_L = -3,62$ и $-3,46$ %), что согласуется со сценарием объединения и перераспределения дефектов: при укрупнении дефектных областей и «сглаживании» сети мелких контуров суммарная доля дефектов и число отдельных дефектов могут уменьшаться, хотя структурная неоднородность и наличие крупных дефектов сохраняются. Именно наличие двух конкурирующих механизмов (разветвление дефектов и их слияние) объясняет, почему по совокупности зон ΔD_s и D_L имеют положительный средний тренд, но отдельные образцы демонстрируют обратную динамику.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам морфологического анализа установлено, что уже на ранней стадии воздействия замораживания – оттаивания в асфальтобетоне фиксируются первичные изменения дефектного пространства, которые следует рассматривать как исходные предпосылки последующего снижения ресурса. В сред-

нем по исследованным зонам наблюдается рост интегральной дефектности: доля дефектной области увеличивается до 9 %, а показатели, характеризующие развитие дефектов по границам, также демонстрируют положительную динамику. Это означает, что ключевым морфологическим проявлением начальной деградации служит не только раскрытие пор и микропустот, но и перестройка конфигурации дефектов с вовлечением межфазных и межзерновых областей в процесс микроповрежденности.

Одновременно показано, что первичные изменения не являются строго однотипными: наряду со сценарием разветвления дефектной сети, сопровождаемым усложнением контуров и появлением новых дефектных элементов, реализуется сценарий объединения, при котором дефекты укрупняются и перераспределяются в менее фрагментированную, но более «концентрированную» структуру дефектов. Наличие двух конкурирующих механизмов объясняет вариативность реакции отдельных зон и подтверждает, что надежная диагностика ранней стадии деградации должна опираться на совместную оценку площадных и линейных морфологических показателей, а не на один параметр.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Кирюхин Г.Н.* К вопросу о теории структуры асфальтобетона // *Дороги и мосты*. 2019. № 1 (41). С. 247–261. EDN STEFLF.
2. *Yu J., Feng Zh., Chen Ya., Yu H., Korolev E., Obukhova S. et al.* Investigation of cracking resistance of cold asphalt mixture designed for ultra-thin asphalt layer // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 414. P. 134941. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134941. EDN KEMLMO.
3. *Шестаков Н.И., Чертец К.Л., Ткач Е.В.* Сравнительный анализ биопозитивности проектных решений объектов дорожно-транспортного комплекса // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2022. № 3 (39). С. 106–120. DOI: 10.21869/2311-1518-2022-39-3-106-120. EDN VHOAQ.
4. *Обухова С.Ю., Будкина А.О., Королев Е.В.* Особенности структурообразования модифицированного вяжущего в присутствии резиновой крошки. Часть 1. Совместимость резиновой крошки с углеводородными пластификаторами // *Региональная архитектура и строительство*. 2024. № 1 (58). С. 24–32. DOI: 10.54734/20722958_2024_1_24. EDN SOSNAR.
5. *Королев И.В.* Модель строения битумной пленки на минеральных зернах в асфальтобетоне // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1981. № 8. С. 63–67.
6. *Ядыкина В.В.* Управление процессами формирования и качеством строительных композитов с учетом состояния поверхности дисперсного сырья : монография. М. : Изд-во АСВ, 2009. 374 с. EDN SAPOYD.
7. *Ядыкина В.В., Траутвайн А.И.* Влияние механоактивации минеральных порошков на взаимодействие с битумом и на структурообразование асфальтовяжущего // *Ассоциация исследователей асфальтобетона : сб. ст. и докл. ежегодной науч. сессии*. 2013. С. 26–32. EDN ZIXYOP.
8. *Братчун В.И., Пиеничных О.А., Ромасюк Е.А., Пономаренко П.В., Васильева Т.А., Коваль Д.И. и др.* О формировании структуры адсорбционно-сольватных слоев асфальтохризотилового вяжущего вещества на поверхности минеральных материалов дорожного асфальтобетона // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2022. № 1 (153). С. 114–121. EDN VWEBYO.
9. *Иноземцев С.С., Королев Е.В.* Оценка влияния степени гидратации цемента на свойства получаемого на его основе минерального наполнителя для асфальтобетонов // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2017. № 4–5 (56–57). С. 77–84. EDN ZHMYTR.
10. *Высоцкая М.А., Русина С.Ю., Резников А., Хлевной И.* Пористые дисперсные наполнители в бинарных композициях // *Эффективные строительные композиты : науч.-практ. конф. к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук Баженова Юрия Михайловича*. 2015. С. 95–99. EDN UDANSF.
11. *Никольский В.Г., Дударева Т.В., Красоткина И.А., Зверева У.Г., Бекешев В.Г., Рочев В.Я. и др.* Разработка и свойства новых наномодификаторов для дорожного покрытия // *Химическая физика*. 2014. Т. 33. № 7. С. 87. DOI: 10.7868/S0207401X14070073. EDN SGVXUL.
12. *Левкович Т.И., Воробьев Е.Г., Терешина Ю.В.* Особенности структуры и свойств модифицированных асфальтобетонов и битумов // *Научный альманах*. 2024. № 2–3 (112). С. 30–35. EDN IHQPCN.
13. *Шестаков Н.И., Урханова Л.А., Буянтуев С.Л., Семенов А.П., Смирнягина Н.Н.* Асфальтобетон с использованием углеродных наномодификаторов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2015. № 6. С. 21–24. EDN ULFTKT.
14. *Самаров А.С.* Асфальтобетоны плотной структуры с улучшенными свойствами // *Вестник науки*. 2024. Т. 4. № 7 (76). С. 284–289. EDN KVOVCG.
15. *Ходан Е.П., Кравченко С.Е.* Исследование влияния изменения физико-механических свойств на формирование структуры и доуплотнения свежеуложенного асфальтобетона // *Дорожное строительство и его инженерное обеспечение : мат. Междунар. науч.-техн. конф.* 2020. С. 84–89. EDN YMXXDMV.
16. *Губа В.В., Губа К.Р., Третьякова Л.Н.* Изменение состава, структуры и текстуры асфальтобетона в процессе эксплуатации // *Вести Автомобильно-дорожного института*. 2023. № 3 (46). С. 17–24. EDN QLGXDH.
17. *Zhevanov V., Bratchun V., Postoenko V.* Increasing the fatigue life of asphalt concrete by complex modification of their structure // *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2023. No. 4 (162). Pp. 70–75. EDN DVNNDU.
18. *Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624277.* База данных видов двухкомпонентных структур асфальтобетона по особенностям структурообразования / *Потанова А.С.* 2023.
19. *Wang L., Yao Y., Li Ju., Tao Y., Liu K.* Review of visualization technique and its application of road aggregates based on morphological features // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Issue 20. P. 10571. DOI: 10.3390/app122010571. EDN JHBVDP.
20. *Ломов С.В., Морковкин А.И.* Исследование микроструктуры асфальтобетона с использованием рентгеновской компьютерной томографии // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2024.

T. 90. № 7. С. 40–47. DOI: 10.26896/1028-6861-2024-90-7-40-47. EDN PKRWUQ.

21. Shakiba M., Darabi M.K., Abu Al-Rub R.K., You T., Little D.N., Masad E.A. Three-dimensional microstructural modelling of coupled moisture–mechanical response of asphalt concrete // *International Journal of Pavement Engineering*. 2015. Vol. 16. Issue 5. Pp. 445–466. DOI: 10.1080/10298436.2015.1007239

22. Du C., Liu P., Sun Y., Chen J., Liu Q., Oeser M. Characterizing asphalt mixtures with random aggregate gradations based on the three-dimensional locally homogeneous model // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2022. Vol. 37. Issue 13. Pp. 1687–1702. DOI: 10.1111/mice.12796. EDN TLYITA.

Поступила в редакцию 6 марта 2026 г.

Принята в доработанном виде 13 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 13 апреля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Николай Игоревич Шестаков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2893-7386, Scopus: 57205223447, ORCID: 0000-0002-6809-4993; SHestakovNI@mgsu.ru;

Владимир Артурович Дзучев — студент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; vdzucev699@gmail.com;

Иван Романович Полев — студент; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; drpolev15@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kiryukhin G.N. On the theory of asphalt concrete structure. *Roads and Bridges*. 2019; 1(41):247-261. EDN STEFLF. (rus.).

2. Yu J., Feng Zh., Chen Ya., Yu H., Korolev E., Obukhova S. et al. Investigation of cracking resistance of cold asphalt mixture designed for ultra-thin asphalt layer. *Construction and Building Materials*. 2024; 414:134941. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.134941. EDN KEMLMO.

3. Shestakov N.I., Chertes K.L., Tkach E.V. Comparative analysis of biopositiveness of design solutions of objects of the road and transport complex. *Biosphere Compatibility: Human, Region, Technologies*. 2022; 3(39):106-120. DOI: 10.21869/2311-1518-2022-39-3-106-120. EDN VIHOAQ. (rus.).

4. Obukhova S.Yu., Budkina A.O., Korolev E.V. Structure formation of modified binder in the presence of crumb rubber part 1. Compatibility of crumb rubber and hydrocarbon plasticizers. *Regional Architecture and Engineering*. 2024; 1(58):24-32. DOI: 10.54734/20722958_2024_1_24. EDN SOSNAR. (rus.).

5. Korolev I.V. Model of the structure of bitumen film on mineral grains in asphalt concrete. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1981; 8:63-67. (rus.).

6. Yadykina V.V. Management of formation processes and quality of building composites considering

the surface state of dispersed raw materials. Moscow, ASV Publishing House, 2009; 374. EDN SAPOYD. (rus.).

7. Yadykina V.V., Trautvain A.I. Influence of mechanical activation of mineral powders on interaction with bitumen and on structure formation of asphalt binder. *Association of Asphalt Concrete Researchers : Proceedings of the Annual Scientific Session*. 2013; 26-32. EDN ZIXYOP. (rus.).

8. Bratchun V., Pshenichnykh O., Romasyuk E., Ponomarenko P., Vasilyeva T., Koval D. et al. On the formation of the structure of adsorption-solvate layers of asphalt chrysotile binder on the surface of mineral materials of road asphalt concrete. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2022; 1(153):114-121. EDN VWEBYO. (rus.).

9. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Evaluation of the influence of the degree of hydration of cement on the properties of the mineral filler for asphalt concrete. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017; 4-5(56-57):77-84. EDN ZHMYTR. (rus.).

10. Vysotskaya M.A., Rusina S.Yu., Reznikov A., Khlevnoy I. Porous dispersed fillers in binary compositions. *Effective building composites : scientific and practical conference dedicated to the 85th anniversary of the Honored Scientist of the Russian Federation, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sci-*

ences Yuri Mikhailovich Bazhenov. 2015; 95-99. EDN UDANSF. (rus.).

11. Nikolsky V.G., Dudareva T.V., Krasotkina I.A., Zvereva U.G., Bekeshev V.G., Rochev V.Ya. et al. Development and properties of new nanomodifiers for road pavement. *Khimicheskaya Fizika*. 2014; 33(7):87. DOI: 10.7868/S0207401X14070073. EDN SGVXUL. (rus.).

12. Levkovich T.I., Worobjev E.G., Teresina Yu.W. Features of the structure and properties of modified asphalt concrete and bitumen. *Scientific Almanac*. 2024; 2-3(112):30-35. EDN IHQPCN. (rus.).

13. Shestakov N.I., Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Semenov A.P., Smirnyagina N.N. Asphalt concrete using carbon nanomodifiers. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2015; 6:21-24. EDN ULFTKT. (rus.).

14. Samarov A.S. Asphalt concrete of dense structure with improved properties. *Science Bulletin*. 2024; 4(7):(76):284-289. EDN KVOVCG. (rus.).

15. Khodan E.P., Kravchenko S.E. Investigation of the influence of changes in physical and mechanical properties on structure formation and compaction of freshly laid asphalt concrete. *Road Construction and its Engineering Support : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. 2020; 84-89. EDN YMXDMV. (rus.).

16. Guba V.V., Guba K.R., Tretiakova L.N. Changes in the asphalt concrete composition, structure and texture during operation. *Bulletin of the Automobile and Road Institute*. 2023; 3(46):17-24. EDN QLGXDH. (rus.).

17. Zhevanov V., Bratchun V., Postoenko V. Increasing the fatigue life of asphalt concrete by complex modification of their structure. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2023; 4(162):70-75. EDN DVNNDU.

18. Certificate of state registration of the database No. 2023624277. *Database of types of two-component asphalt concrete structures according to the features of structure formation / Potapova A.S.* 2023.

19. Wang L., Yao Y., Li Ju., Tao Y., Liu K. Review of visualization technique and its application of road aggregates based on morphological features. *Applied Sciences*. 2022; 12(20):10571. DOI: 10.3390/app122010571. EDN JHBVDP.

20. Lomov S.V., Morkovkin A.I. Study of the microstructure of asphalt concrete using X-Ray computed tomography. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2024; 90(7):40-47. DOI: 10.26896/1028-6861-2024-90-7-40-47. EDN PKRWUQ. (rus.).

21. Shakiba M., Darabi M.K., Abu Al-Rub R.K., You T., Little D.N., Masad E.A. Three-dimensional microstructural modelling of coupled moisture-mechanical response of asphalt concrete. *International Journal of Pavement Engineering*. 2015; 16(5):445-466. DOI: 10.1080/10298436.2015.1007239

22. Du C., Liu P., Sun Y., Chen J., Liu Q., Oeser M. Characterizing asphalt mixtures with random aggregate gradations based on the three-dimensional locally homogeneous model. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2022; 37(13):1687-1702. DOI: 10.1111/mice.12796. EDN TLYITA.

Received March 06, 2026.

Adopted in revised form on March 13, 2026.

Approved for publication on April 13, 2026.

B I O N O T E S: **Nikolay I. Shestakov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2893-7386, Scopus: 57205223447, ORCID: 0000-0002-6809-4993; SHestakovNI@mgsu.ru;

Vladimir A. Dzutsev — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; vdzutsev699@gmail.com;

Ivan R. Polev — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; drpolev15@gmail.com.

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

The authors declare no conflict of interest.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 699.844

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.781-800

Сравнительный анализ российских, зарубежных и международных нормативных требований к звукоизоляции воздушного шума в гражданских зданиях

Валерий Иванович Теличенко¹, Михаил Дмитриевич Васильев²,
Никита Сергеевич Рудь³, Николай Георгиевич Канев^{1,2}

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

² *Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры
и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия;*

³ *Нью иммо сервисиз; г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Воздействие шума внутренней среды зданий на здоровье человека подтверждено систематическими обзорами и признано фактором риска Всемирной организацией здравоохранения. Нормирование звукоизоляции значительно различается между странами, однако существующие сравнительные исследования сосредоточены преимущественно на европейском контексте и не включали критерии систем экологической сертификации. Представлен сравнительный анализ нормативных требований к изоляции воздушного шума внутренними ограждающими конструкциями гражданских зданий в 43 странах, а также акустических критериев систем рейтинговой оценки зданий WELL, BREEAM и LEED.

Материалы и методы. Для обеспечения корректности сопоставления выполнена математическая конвертация нормативных значений национальных индексов звукоизоляции (R_w , DnT_w , STC и др.) с их приведением к единому эквивалентному индексу натурной звукоизоляции R'_w на основании обобщенных соотношений ISO/FDIS 19488.

Результаты. Установлено, что в мировой практике применяется не менее семи базовых индексов. Для межквартирных перегородок медиана R'_w составила 52 дБ (размах: 43–58 дБ), российский норматив ($R'_w \geq 50$ дБ) находится в диапазоне медианных значений. Показано, что отечественная нормативная база характеризуется более глубокой типологической детализацией по сравнению с системами WELL, BREEAM и LEED.

Выводы. Российские нормативные требования по большинству рассмотренных категорий сопоставимы с требованиями ведущих европейских стран и превышают базовые пороги стран АТР. Вместе с тем отсутствие в отечественном стандарте обязательных спектральных адаптационных поправок и механизма натурной верификации представляет направление для дальнейшего совершенствования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: звукоизоляция, акустический комфорт, нормирование, экологическая безопасность, «зеленое» строительство

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Теличенко В.И., Васильев М.Д., Рудь Н.С., Канев Н.Г. Сравнительный анализ российских, зарубежных и международных нормативных требований к звукоизоляции воздушного шума в гражданских зданиях // Т. 21. Вып. 5. С. 781–800. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.781-800

Автор, ответственный за переписку: Михаил Дмитриевич Васильев, mick03vasil@mail.ru.

Comparative analysis of Russian, foreign, and international regulatory requirements for airborne sound insulation in civil buildings

Valeriy I. Telichenko¹, Mikhail D. Vasiliev², Nikita S. Rud³, Nikolay G. Kanev^{1,2}

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

² *Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences
(NIISF RAASN); Moscow, Russian Federation;*

³ *New Immo Services; Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The impact of indoor noise on human health has been confirmed by systematic reviews and recognized as a risk factor by WHO. Existing comparative studies have predominantly focused on European contexts and have not incorporated criteria from green building certification systems. This paper presents a comparative analysis of regulatory requirements for airborne sound insulation of internal building partitions in 43 countries, along with acoustic criteria of WELL, BREEAM, and LEED.

Materials and methods. A mathematical conversion of national sound insulation indices was performed, reducing them to a unified equivalent in-situ index R'_w based on generalized relationships from ISO/FDIS 19488.

Results. At least seven distinct regulatory indices are used globally. For inter-apartment partitions, the median R'_w was 52 dB (range: 43–58 dB), with the Russian standard ($R'_w \geq 50$ dB) falling within the median range. The Russian regulatory framework features a deeper typological classification compared to WELL, BREEAM, and LEED.

Conclusions. At least seven distinct regulatory indices are used globally. For inter-apartment partitions, the median R'_w was 52 dB (range: 43–58 dB), with the Russian standard ($R'_w \geq 50$ dB) falling within the median range. The Russian regulatory framework features a deeper typological classification compared to WELL, BREEAM, and LEED.

KEYWORDS: sound insulation, acoustic comfort, building acoustics standards, green standards, comparison of regulatory documentation, environmental safety, green building

FOR CITATION: Telichenko V.I., Vasiliev M.D., Rud' N.S., Kanev N.G. Comparative analysis of Russian, foreign, and international regulatory requirements for airborne sound insulation in civil buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):781-800. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.781-800 (rus.).

Corresponding author: Mikhail D. Vasiliev, mick03vasil@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Архитектурная среда оказывает существенное влияние на психофизиологическое состояние человека [1–3]. Соответственно, проектируемый объект должен не только исключать негативное воздействие, но и способствовать формированию комфортной, здоровьесберегающей среды, обеспечивающей оптимальные условия для жизнедеятельности и труда [4, 5].

Воздействие шума внутренней среды зданий на здоровье человека подтверждено систематическими обзорами и признано фактором риска Всемирной организацией здравоохранения¹. В частности, шум выступает фактором риска развития артериальной гипертензии, острых нарушений мозгового кровообращения и депрессивных состояний у взрослых [6–8], а также способствует развитию диабета, инсомнии (нарушение сна) и снижению когнитивных функций у детей школьного возраста [9, 10].

Проектирование акустически комфортной и безопасной среды представляет собой комплексную многокритериальную задачу, решаемую на всех этапах проектного цикла. Данная задача требует тщательного обоснования и подбора ограждающих элементов здания: междуэтажных перекрытий, внутренних перегородок, а также многослойных¹ конструкций полов и подвесных потолков. Вместе с тем при разработке проектной документации следует учитывать международную специфику нормирования звукоизоляции: каждое государство применяет собственные нормативные критерии и методы оценки частотных характеристик, что детерминировано историческими, эконо-

мическими и социокультурными особенностями конкретного региона^{2, 3} [11, 12].

Практика нормирования звукоизоляции воздушного шума внутренними ограждающими конструкциями гражданских зданий в Российской Федерации характеризуется продолжительным периодом становления и развития⁴ [13, 14]. Тем не менее в международной практике наблюдается существенная дифференциация как в историческом аспекте формирования нормативной базы, так и в уровне строгости предъявляемых акустических критериев. На современном этапе большинство государств применяет собственные национальные стандарты акустического нормирования. На территории РФ базовым нормативным документом в данной предметной области выступает СП 51.13330.2011 «Защита от шума»⁵.

Сравнительный анализ национальных акустических нормативов является предметом ряда международных исследований. Наиболее масштабная работа выполнена В. Rasmussen [15], который систематизировал требования к звукоизоляции жилых зданий в 24

² Public Health and Welfare Criteria for Noise, Office of Noise Abatement and Control, U.S. Environmental Protection Agency, EPA 550/9-73-002, 1973.

³ Ивановский Б.Г. 2017.02.039. Неудовлетворительные жилищные условия в Европе: издержки и последствия. Inadequate housing in Europe: costs and consequences / Ahrendt D., Jungblut J.M., Roys M., Nicol S. // European foundation for the improvement of living and working conditions (Eurofound). Luxembourg : publications Office of the EU, 2026. P. 103.

⁴ Отечественный и зарубежный опыт гигиенического нормирования факторов производственной среды. М. : ВНИИ охраны и экономики труда Минтруда России, 2014.

⁵ СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03–2003 (с Изменением № 1) : утв. приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 28.12.2010 № 825 и введ. в действие с 20.05.2011.

¹ World Health Organization. Environmental Noise Guidelines for the European Region. Copenhagen : WHO, 2018.

европейских странах и проанализировал их взаимосвязь с классификационными схемами акустического качества. В рамках проекта COST Action TU0901 [16] была предпринята попытка формирования единой европейской методологической основы акустического нормирования. Вопросы соотношения лабораторных и натурных индексов исследованы W. Scholl и соавт. [17], а субъективное восприятие звукоизоляции жильцами — V. Hongisto и соавт. [18].

Однако существующие сравнительные исследования имеют ряд ограничений. Во-первых, они сосредоточены преимущественно на европейском контексте и не охватывают страны Азии, Ближнего Востока, Южной Америки и Африки. Во-вторых, до настоящего времени не проводилось систематическое количественное сопоставление национальных нормативов с критериями международных систем экологической сертификации (WELL⁶, BREEAM⁷, LEED⁸), получающих все большее распространение в мировой проектной практике. В-третьих, имеющиеся работы ограничиваются, как правило, одной-двумя категориями помещений (преимущественно жилыми зданиями), в то время как комплексный анализ, охватывающий офисные, гостиничные, образовательные и лечебно-профилактические учреждения, до сих пор не проводился.

Цель исследования — разработать методику приведения нормируемых индексов звукоизоляции к единому эквивалентному показателю R'_w и на ее основе выполнить количественное сопоставление требований 43 стран мира и трех систем экологической рейтинговой оценки зданий (WELL, BREEAM, LEED) с нормами СП 51.13330.2011 по пяти категориям гражданских помещений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящее время не существует общепринятой методики прямого перевода между различными национальными индексами звукоизоляции, поскольку соотношения между ними зависят от объемно-планировочных характеристик помещений и физико-механических свойств ограждающих конструкций [15–17]. В связи с этим математическая конвертация допустима лишь при определенных допущениях.

Для осуществления сравнительного анализа приняты следующие допущения: равенство геометрических размеров смежных помещений, идентичность типов ограждающих конструкций, сопоставимость акустических характеристик отделки. Данные

допущения соответствуют подходу, принятому в ISO/FDIS 19488⁹ и работах В. Rasmussen [15, 16].

Унифицируем требуемые показатели изоляции воздушного шума, представленные в табл. 1, и приведем их к единому базису — индексу изоляции воздушного шума в натуральных условиях с учетом путей косвенной передачи звука R'_w . Согласно акустическим закономерностям⁹, натурный индекс R'_w в среднем на 2 дБ ниже лабораторного или расчетного показателя R_w . Показатель $R'_w + C$ принимается на 2 дБ меньше базового R_w . Для ограждающих конструкций между идентичными помещениями индекс $DnT_{w,v}$ принимается на 3 дБ меньше R'_w , а показатель $DnT_{w,v} + C$ — на 4 дБ меньше R'_w . Американские метрики соотносятся следующим образом: STC на 2 дБ, а ASTC на 3 дБ превышают значение R'_w .

Принятые фиксированные коэффициенты представляют собой усредненные значения, справедливые для типовых массивных перегородок. Фактическое расхождение зависит от типа конструкции, объема приемного помещения и спектрального состава шума. По данным W. Scholl и соавт. [17], разница $R_w - R'_w$ для массивных однослойных конструкций составляет 1–3 дБ, для каркасно-обшивных — 3–8 дБ, а для легких перегородок — до 10 дБ.

Таким образом, систематическая погрешность конвертации оценивается в ± 2 –3 дБ для большинства пар индексов. Эта погрешность не влияет на общие закономерности распределения стран по уровню строгости нормативов, однако ограничивает возможность детального попарного сравнения стран с близкими значениями R'_w .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведен сравнительный анализ нормативных индексов изоляции воздушного шума внутренними ограждающими конструкциями для наиболее распространенных в мировой практике объектов нормирования. В выборку включены смежные помещения следующего функционального назначения: межквартирные стены, офисные помещения (класса С и выше), гостиничные номера, учебные аудитории образовательных учреждений и палаты лечебно-профилактических учреждений [19–21].

Анализ нормативной документации 43 стран позволяет констатировать, что в современной международной строительной практике применяется не менее семи базовых нормативных показателей (индексов) изоляции воздушного шума внутренними ограждающими конструкциями гражданских зданий. Эти индексы существенно различаются как по ширине нормируемого частотного диапазона, так и по методологии оценки (опора на лабораторные или натурные измерения).

⁹ ISO/FDIS 19488 (2018). Acoustics — Acoustic classification of dwellings. ISO, Geneva, Switzerland.

⁶ WELL Building Standard. V. 2.

⁷ BREEAM International New Construction 2016. Technical Manual. SD 233.

⁸ LEED Reference Guide for Building Design and Construction. V. 4 edition.

Табл. 1. Анализ нормативных требований и показателей изоляции воздушного шума внутренними ограждающими конструкциями гражданских зданий в разных странах

Table 1. Analysis of regulatory requirements and airborne sound insulation indices of internal enclosing structures of civil buildings in different countries

Страна Country	Требуемый показатель звукоизоляции воздушного шума, дБ Required sound insulation index of airborne noise, dB				
	межквартирных перегородок в жилых многоквартирных зданиях between apartments in multi-apartment residential buildings	между офисами класса C between Class C offices	между гостиничными номерами between hotel rooms	между двумя классами образовательных учреждений between two classrooms in educational institutions	между палатами медицинско- санаторных учреждений between wards in medical and sanatorium institutions
Россия Russia	$R_w \geq 52$	$R_w \geq 45$	$R_w \geq 50$	$R_w \geq 45$	$R_w \geq 48$
Австралия Australia	$R'_w + C \geq 50$	$R'_w \geq 45$	$R'_w + C \geq 50$	$R'_w \geq 45$	$R'_w \geq 45$
Австрия Austria	$DnT_w \geq 55$	$R'_w \geq 42$	$DnT_w \geq 50$	$DnT_w \geq 55$	$DnT_w \geq 50$
ОАЭ (Дубай) UAE (Dubai)	$DnT_w + C \geq 48$	$DnT_w \geq 48$	$DnT_w \geq 43$	$DnT_w \geq 45$	$DnT_w \geq 42$
Аргентина Argentina	$R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 47$	$R'_w \geq 50$
Бельгия Belgium	$DnT_w + C \geq 54$	$DnT_w \geq 44$	$DnT_w \geq 49$	$DnT_w \geq 44$	$DnT_w \geq 47$
Беларусь Belarus	$R_w \geq 52$	$R_w \geq 47$	$R_w \geq 51$	$R_w \geq 48$	$R_w \geq 48$
Болгария Bulgaria	$R'_w \geq 53$	$R'_w \geq 42$	$R'_w \geq 54$	$R'_w \geq 55$	$R'_w \geq 54$
Бразилия Brazil	$DnT_w \geq 45$	–	–	–	–
Британия Britain	$DnT_w + C \geq 48$	$DnT_w \geq 48$	$DnT_w \geq 43$	$DnT_w \geq 45$	$DnT_w \geq 42$
Венгрия Hungary	$R'_w + C \geq 51$	$R'_w + C \geq 37$	$R'_w + C \geq 47$	$R'_w + C \geq 45$	$R'_w + C \geq 50$
Вьетнам Vietnam	$R_w \geq 45$	$R_w \geq 45$	$R_w \geq 45$	$R_w \geq 45$	$R_w \geq 40$
Германия Germany	$R'_w \geq 53$	$R'_w \geq 37$	$R'_w \geq 47$	$R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 52$
Дания Denmark	$R'_w \geq 55$	$R'_w \geq 40$	$R'_w \geq 48$	$R'_w \geq 48$	$R'_w \geq 48$
Египет Egypt	$R_w \geq 45$	$R_w \geq 40$	$R_w \geq 45$	$R_w \geq 40$	$R_w \geq 40$
Индия India	$R_w \geq 45$	$R_w \geq 40$	$R_w R_w \geq 45$	$R_w \geq 40$	$R_w \geq 40$
Иран Iran	$R_w \geq 50$	$R_w \geq 45$	$R_w \geq 50$	$R_w \geq 45$	$R_w \geq 45$
Исландия Iceland	$R'_w \geq 55$	$R'_w R'_w \geq 40$	$R'_w \geq 52$	$R'_w \geq 44$	$R'_w \geq 52$
Испания Spain	$DnT_w \geq 50$	$R'_w \geq 40$	$R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 50$
Италия Italy	$R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 55$

Продолжение табл. 1 / Continue of the Table 1

Страна Country	Требуемый показатель звукоизоляции воздушного шума, дБ Required sound insulation index of airborne noise, dB				
	межквартирных перегородок в жилых многоквартирных зданиях between apartments in multi-apartment residential buildings	между офисами класса C between Class C offices	между гостиничными номерами between hotel rooms	между двумя классами образовательных учреждений between two classrooms in educational institutions	между палатами медицинско-санаторных учреждений between wards in medical and sanatorium institutions
Казахстан Kazakhstan	$R_w \geq 52$	$R_w \geq 47$	$R_w \geq 51$	$R_w R_w \geq 48$	$R_w \geq 48$
Канада Canada	$ASTC \geq 55$	$ASTC \geq 45$	$ASTC \geq 50$	$ASTC \geq 50$	$ASTC \geq 52$
Катар Qatar	$STC \geq 50$	$STC \geq 45$	$STC \geq 50$	$STC \geq 45$	$STC \geq 45$
Китай China	$R'_w + C \geq 50$	$R'_w + C \geq 45$	$R'_w + C \geq 45$	$R'_w + C \geq 45$	$R'_w + C \geq 45$
Нигерия Nigeria	$STC \geq 45$	$STC \geq 45$	$STC \geq 45$	$STC \geq 45$	$STC \geq 40$
Нидерланды Netherlands	$R'_w + C \geq 52$	$R'_w + C \geq 42$	$R'_w + C \geq 48$	$R'_w + C \geq 45$	$R'_w + C \geq 50$
Норвегия Norway	$R'_w \geq 55$	$R'_w \geq 37$	$R'_w \geq 48$	$R'_w \geq 44$	$R'_w \geq 48$
Польша Poland	$R'_w + C \geq 50$	$R'_w \geq 35$	$R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 45$	$R'_w \geq 50$
Португалия Portugal	$DnT_w \geq 50$	–	$DnT_w \geq 45$	$DnT_w \geq 45$	$DnT_w \geq 45$
Саудовская Аравия Saudi Arabia	$STC \geq 50$	$STC \geq 45$	$STC \geq 50$	$STC \geq 50$	$STC \geq 45$
Сербия Serbia	$R'_w \geq 52$	$R'_w \geq 35$	$R'_w \geq 45$	$R'_w \geq 45$	$R'_w \geq 45$
Сингапур Singapore	$STC \geq 50$	$STC \geq 45$	$STC \geq 50$	$STC \geq 45$	$STC \geq 45$
США USA	$STC \geq 48$	$STC \geq 45$	$STC \geq 48$	$STC \geq 48$	$STC \geq 45$
Турция Turkey	$DnT_w + C \geq 52$	$DnT_w \geq 49$	$DnT_w \geq 52$	$DnT_w \geq 50$	$DnT_w \geq 52$
Финляндия Finland	$DnT_w \geq 55$	$R'_w \geq 35$	$R'_w \geq 48$	$R'_w \geq 44$	$R'_w \geq 48$
Франция France	$DnT_w + C \geq 53$	–	$DnT_w \geq 50$	$DnT_w + C \geq 43$	$DnT_w \geq 42$
Чехия Czech Republic	$R'_w \geq 53$	$R'_w \geq 37$	$R'_w \geq 47$	$R'_w \geq 47$	$R'_w \geq 47$
Чили Chile	$RA \geq 45$	$RA \geq 45$	$RA \geq 45$	$RA \geq 45$	$RA \geq 45$
Швейцария Switzerland	$DnT_w + C \geq 52$	$DnT_w \geq 49$	$DnT_w \geq 52$	$DnT_w + C \geq 45$	$DnT_w \geq 52$
Швеция Sweden	$DnT_w + C \geq 52$	$R'_w \geq 37$	$R'_w \geq 48$	$R'_w \geq 40$	$R'_w \geq 48$
ЮАР South Africa	$DnT_w \geq 45$	$DnT_w \geq 40$	$DnT_w \geq 45$	$DnT_w \geq 40$	$DnT_w \geq 40$

Страна Country	Требуемый показатель звукоизоляции воздушного шума, дБ Required sound insulation index of airborne noise, dB				
	межквартирных перегородок в жилых многоквартирных зданиях between apartments in multi-apartment residential buildings	между офисами класса C between Class C offices	между гостиничными номерами between hotel rooms	между двумя классами образовательных учреждений between two classrooms in educational institutions	между палатами медицинско- санаторных учреждений between wards in medical and sanatorium institutions
Южная Корея South Korea	$R_w \geq 48$	$R_w \geq 45$	$R_w \geq 48$	$R_w \geq 45$	$R_w \geq 40$
Япония Japan	$DnT_w \geq 40$	$DnT_w \geq 40$	$DnT_w \geq 40$	$DnT_w \geq 30$	$DnT_w \geq 35$

Примечание: R_w — показатель, служащий для оценки одним числом изоляции воздушного шума ограждающей конструкцией, определяемый теоретическим расчетом, нормируемый диапазон от 100 до 3150 Гц; R'_w — показатель, служащий для оценки одним числом изоляции воздушного шума ограждающей конструкцией, определяемый натурными измерениями ограждающей конструкции. Нормируемый диапазон от 100 до 3150 Гц; RA — то же, что и R'_w , но используется расширенный частотный диапазон от 100 до 5000 Гц; DnT_w — показатель, получаемый при натурных измерениях, учитывающий значения в помещениях высокого и низкого уровней звукового давления с учетом времени реверберации помещения, косвенных путей передачи и наличия любых отверстий (например, вентиляция, двери и т.д.). Нормируемый диапазон от 100 до 3150 Гц; $DnT_{w,A}$ — то же, что и DnT_w , но используется расширенный частотный диапазон от 100 до 5000 Гц; $DnT_{w,A} = DnT_w + C$, где C — коэффициент, учитывающий расширенный частотный диапазон; STC — показатель, получаемый при лабораторных измерениях, в диапазоне от 125 до 4000 Гц; $ASTC$ — показатель, получаемый при натурных измерениях, в диапазоне от 125 до 4000 Гц.

Note: R_w — single-number quantity for evaluating the airborne sound insulation of an enclosing structure, determined by theoretical calculation; normalized frequency range from 100 to 3,150 Hz; R'_w — single-number quantity for evaluating the airborne sound insulation of an enclosing structure, determined by field measurements. Normalized frequency range from 100 to 3,150 Hz; RA — same as R'_w , but an extended frequency range from 100 to 5,000 Hz is used: $RA = R'_w + C$; DnT_w — single-number quantity obtained from field measurements, taking into account the values in rooms with high and low sound pressure levels, room reverberation time, flanking transmission paths, and the presence of any openings (e.g., ventilation, doors, etc.). Normalized frequency range from 100 to 3,150 Hz; $DnT_{w,A}$ — Same as DnT_w , but an extended frequency range from 100 to 5,000 Hz is used $DnT_{w,A} = DnT_w + C$, C is a spectrum adaptation term accounting for the extended frequency range; STC — index obtained during laboratory measurements in the frequency range from 125 to 4,000 Hz; $ASTC$ — index obtained during field measurements in the frequency range from 125 to 4,000 Hz.

На основе систематизации полученного массива данных мировую практику акустического нормирования целесообразно классифицировать по нескольким основным методологическим направлениям:

- международная школа (на базе стандартов ISO⁹) опирается на базовый индекс R_w и его натуральный аналог R'_w . В ряде европейских государств (Германия¹⁰, Дания¹¹) и Австралии¹² этот показатель интегрируется со спектральными поправками (C , Ctr) для адаптации к реальным спектрам шумового воздействия;
- советская школа также базируется на международном индексе R_w , однако характеризуется стабильным применением его базового (расчетного или лабораторного) значения для внутренних кон-

струкций, как правило, без внедрения спектральных адаптаций, что обеспечивает преемственность с исторической нормативной базой нормирования;

- европейская натурная школа характеризуется строгим приоритетом натурных (полевых) измерений с использованием стандартизированной разности уровней DnT_w (Великобритания¹³, Франция¹⁴, ЮАР¹⁵ и др.^{16, 17});

¹³ BS8233 (2024). Guidance on sound insulation and noise reduction for buildings.

¹⁴ Standard NF S31-057. Acoustics in building. Sound insulation. Classification index.

¹⁵ ASA-TS-RD-CRIT-04. Performance Criteria: Acoustic performance of buildings. Pretoria : Agrément South Africa, 2022.

¹⁶ Turkish Ministry of Environment and Urbanization (2025). Binalarin Gürültüye Karşı Korunmasi Hakkinda Yönetmelik (Regulation on Protection of Buildings against Noise). Republic of Turkey Official Gazette.

¹⁷ ÖNORM B 8115-5:2012, Schallschutz und Raumakustik im Hochbau — Teil 5: Klassifizierung. (Sound insulation and room acoustics in buildings — Classification). ÖNORM, Austria.

¹⁰ DIN 4109-1-2023-01. Sound insulation in buildings. Part 1: Minimum requirements.

¹¹ DS 490-2018. Sound classification of dwellings (Lydklassifikation af boliger). Copenhagen : Danish Standards, 2018.

¹² National Construction Code (NCC) 2022. Volume One. Building Code of Australia. Part F5: Sound Transmission and Insulation. Canberra : Australian Building Codes Board (ABCB), 2022.

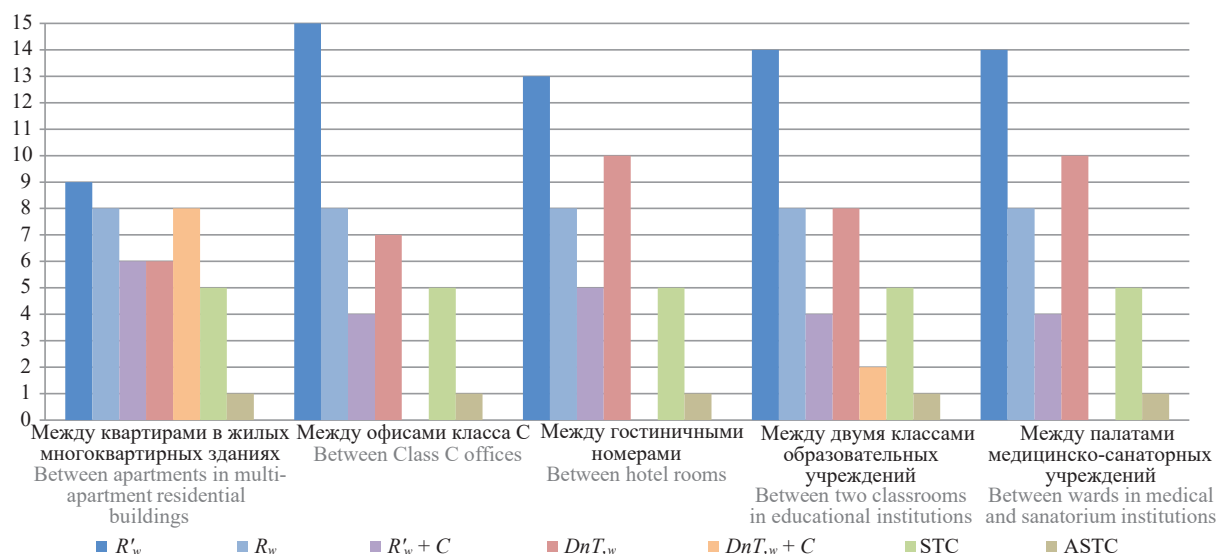


Рис. 1. Гистограммы количества используемых индексов изоляции воздушного шума внутренними ограждающими конструкциями гражданских зданий

Fig. 1. Histograms of the number of airborne sound insulation indices used by internal enclosing structures of civil buildings

• американская школа (на базе ASTM¹⁸) базируется на использовании метрики STC (Sound Transmission Class), получившей широкое распространение не только в Северной Америке¹⁹, но и на Ближнем Востоке²⁰, а также в ряде государств Африки¹⁵ и Азии²¹.

В табл. 2 приведены количественный анализ и распространенность использования индексов изоляции воздушного шума для каждой категории помещений, результаты графически представлены на рис. 1.

Результаты количественного анализа свидетельствуют о том, что среди 43 рассмотренных государств наибольшее распространение в качестве нормативного критерия получил индекс изоляции воздушного шума, определяемый в натуральных условиях R'_w . Данный параметр используется в 15 странах выборки. Вторым по востребованности (12 стран) выступает натуральный индекс DnT_w , дополнительно учитывающий время реверберации помещения. Третье место по частоте применения (по 8 стран) делят между собой базовый расчетный индекс R_w и натуральный индекс со спектральной поправкой $DnT_w + C$. Характерной особенностью использования показателя $DnT_w + C$ является его выраженная функциональная специализация: он применяется преимущественно при нормировании звукоизоляции перегородок между квартирами в жилых многоквартирных зданиях (и лишь в двух случаях — для образовательных учреждений). Такая специфика

обусловлена необходимостью более строгого контроля низкочастотных составляющих бытового шума в жилом фонде.

В табл. 3 представлены результаты конвертации нормативных показателей к единому индексу R'_w с описательной статистикой по каждой категории помещений.

Исходя из унифицированных данных, приведенных в табл. 3, можно констатировать значительную дифференциацию глобальных подходов к акустическому нормированию. Требования Российской Федерации⁵ к звукоизоляции воздушного шума характеризуются достаточно высоким уровнем: по большинству категорий помещений отечественные нормативы уверенно входят в первую треть мирового рейтинга.

В категории межквартирных ограждений абсолютными лидерами с показателем 58 дБ выступают Австрия¹⁷, Бельгия²² и Финляндия²³. К ним также приближаются Франция¹⁴ (57 дБ), Турция¹⁶, Швейцария⁹ и Швеция²⁴ (по 56 дБ). Напротив, наиболее мягкие требования зафиксированы в США¹⁸, Японии²¹ и Чили²⁵, а также в ряде развивающихся

¹⁸ International Building Code (IBC), International Code Council. 2021 edition.

¹⁹ The National Building Code of Canada (NBC). 2025.

²⁰ Dubai Building Code (DBC). 2021 edition. Dubai : Government of Dubai, 2021.

²¹ Japan Noise Regulation Law No. 98 of 1968. Latest Amendment by Law No. 91 of 2000.

²² NBN S 01-400-1:2019. Acoustics – Acoustic criteria for residential buildings, version for public enquiry, available in Dutch or French from the Belgian Bureau for Standardisation (NBN).

²³ SFS 5907:2024. Rakennusten Akustinen Luokitus, Finland. (English version 2025: Acoustic classification of spaces in buildings).

²⁴ SS 25267:2015. Byggakustik — Ljudklassning av utrymmen i byggnader — Bost.

²⁵ Chilean Standard prNCh352/1 — Acústica y vibraciones — Aislación acústica — Parte 1: Clasificación acústica de la edificación residencial (Sound and Vibration: Sound Insulation — part 1: Acoustic classification for residential buildings).

Табл. 2. Используемые индексы изоляции воздушного шума внутренними ограждающими конструкциями гражданских зданий

Table 2. Used indices of airborne sound insulation by internal enclosing structures of civil buildings

Индекс звукоизоляции воздушного шума Airborne sound insulation index	Количество используемых индексов для конструкций Number of used indices used for structures					Количество стран, использующих индекс Number of countries using the index
	между квартирами в жилых многоквартирных зданиях between apartments in multi-apartment residential buildings	между офисами класса C between Class C offices	между гостиничными номерами between hotel rooms	между двумя классами образовательных учреждений between two classrooms in educational institutions	между палатами медицинско-санаторных учреждений between wards in medical and sanatorium institutions	
R_w	8	8	8	8	8	8
R'_w	9	15	13	14	14	15
$R'_w + C$	6	4	5	4	4	6
DnT_{w}	6	7	10	8	10	12
$DnT_{w} + C$	8	0	0	2	0	8
ASTC	1	1	1	1	1	1
STC	5	5	5	5	5	5

стран Азии и Африки (Вьетнам²⁶, Индия²⁷, Египет²⁸, Нигерия²⁹ — по 43 дБ). При интерпретации этих значений необходимо учитывать, что в рамках данного исследования сравниваются минимально допустимые (базовые) стандарты. Например, в Германии применяется строгая градация индексов в зависимости от класса жилья, а базовый норматив принят в соответствии с документом DIN 4109-1-2018-0110.

Наибольшая вариативность наблюдается при нормировании ограждающих конструкций между кабинетами рядовых офисов (аналог класса C). С одной стороны, Турция¹⁶ и Швейцария⁹ (по 52 дБ), а также Великобритания¹³ и ОАЭ²⁰ (по 51 дБ) предъявляют к коммерческой недвижимости требования, сопоставимые с жилым фондом. С другой стороны, ряд европейских и южноамериканских государств,

в частности Бразилия³⁰, Португалия³¹ и Франция¹⁴, не регламентируют указанный параметр на национальном уровне, оставляя выбор акустических решений на усмотрение технического заказчика. В странах Северной Европы (Финляндия²³, Швеция²⁴) и Восточной Европы (Польша³², Сербия³³) минимальный порог установлен на достаточно низком уровне — 35–37 дБ. Российский показатель $R'_w \geq 43$ дБ совпадает с медианой выборки.

Требования к звукоизоляции смежных гостиничных номеров (на уровне базового стандарта 3 звезды) концептуально близки к нормативам межквартирных перегородок. Наивысшие показатели акустической защиты гостей законодательно закреплены в Швейцарии, Турции и Болгарии³⁴,

²⁶ TCVN 7192-1:2002. Âm học. Đánh giá cách âm trong các công trình xây dựng và các kết cấu xây dựng. Phần 1: Cách âm không khí (Acoustics — Evaluation of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation). Hà Nội : Bộ Khoa học và Công nghệ, 2002.

²⁷ National Building Code of India 2016 (NBC 2016). Vol. 2. Part 8: Building Services. Section 4: Acoustics, Sound Insulation and Noise Control. New Delhi : Bureau of Indian Standards (BIS), 2016.

²⁸ Egyptian Code of Practice (ECP). Egyptian Code for Design and Implementation of Acoustics and Noise Control in Buildings. Cairo : Housing and Building National Research Center (HBRC).

²⁹ National Building Code of Nigeria. Abuja : Federal Ministry of Works and Housing, 2006.

³⁰ ABNT NBR 10152:2022. Acústica — Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. Brazil.

³¹ Decreto-Lei n.º 129/2002 de 11 de maio. Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE). Lisboa : Diário da República, 2002. (Decreto-Lei n.º 96/2008).

³² PN-B-02151-3:2015-10. Akustyka budowlana — Ochrona przed hałasem w budynkach — Część 3: Wymagania dotyczące izolacyjności akustycznej przegród w budynkach i elementów budowlanych. Warszawa : Polski Komitet Normalizacyjny (PKN), 2015.

³³ SRPS U.J6.201:2011. Akustika u građevinarstvu — Tehnički uslovi za projektovanje i građenje zgrada. Beograd : Institut za standardizaciju Srbije (ISS), 2011.

³⁴ Наредба № 4 от 27 декември 2006 г. за ограничаване на вредния шум чрез шумоизолиране на сградите. София : Министерство на регионалното развитие и благоустройството, Държавен вестник, 2006.

Табл. 3. Унифицированные нормативные требования R'_{w} , дБ, с описательной статистикойTable 3. Unified regulatory requirements R'_{w} , dB, with descriptive statistics

Страна Country	Показатель звукоизоляции воздушного шума R'_{w} , дБ Airborne sound insulation index R'_{w} , dB				
	межквартирных перегородок в жилых многоквартирных зданиях between apartments in multi-apartment residential buildings	между офисами класса C between Class C offices	между гостиничными номерами between hotel rooms	между двумя классами образовательных учреждений between two classrooms in educational institutions	между палатами медицинско- санаторных учреждений between wards in medical and sanatorium institutions
Россия Russia	50	43	48	43	46
Австралия Australia	52	45	52	45	45
Австрия Austria	58	42	53	58	53
ОАЭ (Дубай) UAE (Dubai)	52	51	46	48	45
Аргентина Argentina	50	50	50	47	50
Бельгия Belgium	58	47	52	47	50
Беларусь Belarus	50	45	49	46	46
Болгария Bulgaria	53	42	54	55	54
Бразилия Brazil	48	–	–	–	–
Британия Britain	52	51	46	48	45
Венгрия Hungary	53	39	49	47	52
Вьетнам Vietnam	43	43	43	43	38
Германия Germany	53	37	47	50	52
Дания Denmark	55	40	48	48	48
Египет Egypt	43	38	43	38	38
Индия India	43	38	43	38	38
Иран Iran	48	43	48	43	43
Исландия Iceland	55	40	52	44	52
Испания Spain	54	40	50	50	50
Италия Italy	50	50	50	50	55
Казахстан Kazakhstan	50	45	49	46	46

Страна Country	Показатель звукоизоляции воздушного шума R'_w , дБ Airborne sound insulation index R'_w , dB				
	межквартирных перегородок в жилых многоквартирных зданиях between apartments in multi-apartment residential buildings	между офисами класса C between Class C offices	между гостиничными номерами between hotel rooms	между двумя классами образовательных учреждений between two classrooms in educational institutions	между палатами медицинско- санаторных учреждений between wards in medical and sanatorium institutions
Канада Canada	52	42	47	47	49
Катар Qatar	48	43	48	43	43
Китай China	52	47	47	47	47
Нигерия Nigeria	43	43	43	43	38
Нидерланды Netherlands	54	44	50	47	52
Норвегия Norway	55	37	48	44	48
Польша Poland	52	35	50	45	50
Португалия Portugal	53	–	48	48	48
Саудовская Аравия Saudi Arabia	48	43	48	48	43
Сербия Serbia	52	35	45	45	45
Сингапур Singapore	48	43	48	43	43
США USA	46	43	46	46	43
Турция Turkey	56	52	55	53	55
Финляндия Finland	58	35	48	44	48
Франция France	57	–	53	47	45
Чехия Czech Republic	53	37	47	47	47
Чили Chile	47	47	47	47	47
Швейцария Switzerland	56	52	55	49	55
Швеция Sweden	56	37	48	40	48
ЮАР South Africa	48	43	48	43	43
Южная Корея South Korea	46	43	46	43	38

Окончание табл. 3 / End of the Table 3

Страна Country	Показатель звукоизоляции воздушного шума R'_w , дБ Airborne sound insulation index R'_w , dB				
	межквартирных перегородок в жилых многоквартирных зданиях between apartments in multi-apartment residential buildings	между офисами класса C between Class C offices	между гостиничными номерами between hotel rooms	между двумя классами образовательных учреждений between two classrooms in educational institutions	между палатами медицинско-санаторных учреждений between wards in medical and sanatorium institutions
Япония Japan	43	43	43	33	38
Среднее Average	51,3	42,8	48,4	45,7	46,7
Медиана Median	52	43	48	46	46
σ	4,1	4,8	3,1	4,6	4,9
Min	43	35	43	33	38
Max	58	52	55	58	55
Ранг РФ Rank of Russia	24/43	14/40	16/41	24/42	17/42

а также в Италии³⁵ и Австрии (от 53 до 55 дБ). Страны Ближнего Востока (ОАЭ, Катар³⁶, Саудовская Аравия³⁷) и Юго-Восточной Азии (Сингапур³⁸) демонстрируют солидный средний уровень — от 46 до 48 дБ. Российский показатель $R'_w \geq 48$ дБ совпадает с медианой.

При сопоставлении требований к ограждающим конструкциям учебных классов выявлен значительный разрыв: наименьший нормативный порог зафиксирован в Японии (всего 33 дБ), в то время как самые высокие требования традиционно предъявляются в Австрии, Турции и Болгарии. Российский показатель $R'_w \geq 43$ дБ ниже медианы (46 дБ).

Максимальный уровень звукоизоляции больничных палат медицинско-санаторных учреждений регламентирован в Австрии, Швейцарии и Италии. Стоит отметить, что для нормативной базы Италии именно больничные палаты имеют наивысший приоритет (55 дБ) среди всех рассмотренных категорий гражданских объектов. Российский показатель ($R'_w \geq 46$ дБ) совпадает с медианой.

В международной практике встречаются прецеденты отсутствия собственных акустических ко-

дексов. Так, в Люксембурге нормирование носит добровольный характер: при проектировании чаще всего имплементируют строительные нормы соседней Бельгии или иных стран Евросоюза по требованию заказчика. Кроме того, при анализе нормативов крупных государств следует учитывать внутреннюю федеративную или административную специфику. Несмотря на то, что Англия, Уэльс и Шотландия формируют единое государство, эти регионы Великобритании могут иметь отдельные нормативные различия в строительном законодательстве [22]. Аналогичная ситуация с делегированием полномочий характерна для США и Канады, где строительные кодексы отдельных штатов или провинций могут ужесточать акустические требования, но не имеют права опускать их ниже общенационального минимума [23].

Наряду с национальными строительными нормами, регламентирующими минимальные требования, в современной мировой практике все большее значение приобретают международные системы экологической рейтинговой оценки объектов недвижимости. Данные системы ориентированы не просто на соблюдение юридических минимумов, а на целенаправленное проектирование высококачественной, здоровьесберегающей среды жизнедеятельности. Среди наиболее авторитетных международных рейтинговых систем, предъявляющих комплексные и зачастую более строгие требования к акустическому комфорту зданий, выделяются стандарты WELL, BREEAM и LEED.

В табл. 4, 5 представлено аналитическое сопоставление основных нормируемых показателей

³⁵ UNI 11367-2023: la classificazione acustica delle unità immobiliari.

³⁶ Qatar Construction Specifications (QCS 2014). Doha : Ministry of Municipality and Environment, State of Qatar, 2014.

³⁷ SBC 201. Saudi Architectural Building Code. Chapter 12: Interior Environment. Riyadh : Saudi Building Code National Committee (SBCNC), 2018.

³⁸ BCA Green Mark for Residential Buildings (RB:2016). Singapore : Building and Construction Authority (BCA), 2016.

Табл. 4. Сравнение основных нормируемых акустических показателей СП 51.13330.2011 «Защита от шума» и стандартов WELL, BREAM и LEED

Table 4. Comparison of the main standardized acoustic indicators of CP 51.13330.2011 “Noise Protection” and the WELL, BREAM and LEED standards

Нормативный документ Regulatory document	Требуемый показатель звукоизоляции воздушного шума, дБ Required sound insulation index of airborne noise, dB				
	межквартирных перегородок в жилых многоквартирных зданиях between apartments in multi-apartment residential buildings	между офисами класса C between Class C offices	между гостиничными номерами between hotel rooms	между двумя классами образовательных учреждений between two classrooms in educational institutions	между палатами медицинско-санаторных учреждений between wards in medical and sanatorium institutions
СП 51.13330.2011 CP 51.13330.2011	$R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 43$	$R'_w \geq 48$	$R'_w \geq 43$	$R'_w \geq 46$
LEED	$STC_c \geq 55$ ($R'_w \geq 52$)	$STC_c \geq 45$ ($R'_w \geq 42$)	$STC_c \geq 55$ ($R'_w \geq 52$)	$STC_c \geq 50$ ($R'_w \geq 47$)	$STC_c \geq 45$ ($R'_w \geq 42$)
BREEAM	$DnT_{w,c} + C \geq 48$ ($R'_w \geq 51$)	$DnT_{w,c} \geq 48$ ($R'_w \geq 51$)	$DnT_{w,c} \geq 43$ ($R'_w \geq 46$)	$DnT_{w,c} \geq 45$ ($R'_w \geq 48$)	$DnT_{w,c} \geq 42$ ($R'_w \geq 45$)
WELL	$R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 35$	$R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 45$	$R'_w \geq 50$

изоляции воздушного шума, регламентируемых российским СП 51.13330.2011 «Защита от шума», и акустических критериев, необходимых для успешной сертификации по системам WELL, BREEAM и LEED. Учитывая методологические различия рассматриваемых документов (использование различных национальных и международных метрик), для обеспечения корректности сравнительного анализа все исходные значения были конвертированы и приведены к единому знаменателю — индексу изоляции воздушного шума в натуральных условиях R'_w . Процедура унификации показателей выполнена на основе ранее описанных акустических закономерностей соотношения лабораторных и полевых измерений.

Как следует из унифицированных сведений, приведенных в табл. 4, требования к звукоизоляции межквартирных перегородок в жилых многоквартирных зданиях демонстрируют высокую степень сходимости: значения варьируются в узком диапазоне от 50 дБ (СП 51.13330 и WELL) до 52 дБ (LEED), графическое сопоставление показано на рис. 2.

Однако при анализе коммерческой и общественной недвижимости наблюдается существенная дифференциация подходов. Так, для перегородок между офисами класса C наименее строгие требования устанавливает стандарт WELL 35 дБ, в то время как система BREEAM предписывает максимальный уровень защиты 51 дБ. В категории гостиничных номеров наивысший акустический стандарт задает система LEED — 52 дБ. При нормировании звукоизоляции смежных аудиторий образовательных учреждений наиболее жесткие критерии зафиксированы в стандарте BREEAM (48 дБ). В свою очередь,

для палат лечебно-профилактических учреждений (ЛПУ) приоритет отдается стандарту WELL, который регламентирует беспрецедентно высокий для данной категории порог в 50 дБ.

Особого внимания заслуживает тот факт, что базовые нормативные значения российского СП 51.13330 во многих случаях сопоставимы со специализированными международными требованиями, а в ряде категорий (например, больничные палаты — 46 дБ, офисы — 43 дБ) даже превосходят базовые пороги некоторых систем экологической сертификации. Это свидетельствует о том, что отечественная нормативная база обладает достаточным потенциалом для формирования акустически комфортной и здоровой внутренней среды зданий без обязательного привлечения дополнительных «зеленых» стандартов.

В качестве логического продолжения сопоставления в табл. 5 представлен сравнительный анализ нормируемых показателей уровней проникающего (фонового) шума согласно требованиям СП 51.13330.2011 и рейтинговых систем WELL, BREEAM и LEED. Для обеспечения релевантности сравнения в выборку включены исключительно те функциональные типы помещений, которые имеют прямые аналоги во всех рассматриваемых нормативных документах.

Анализ данных, представленных в табл. 5, свидетельствует о высокой степени корреляции между базовыми акустическими требованиями СП 51.13330.2011 и критериями международных систем WELL и BREEAM. Тем не менее WELL устанавливает несколько более жесткие ограничения по максимальному уровню проникающего шума L_{max} в дневное время: например, для жилых комнат этот порог

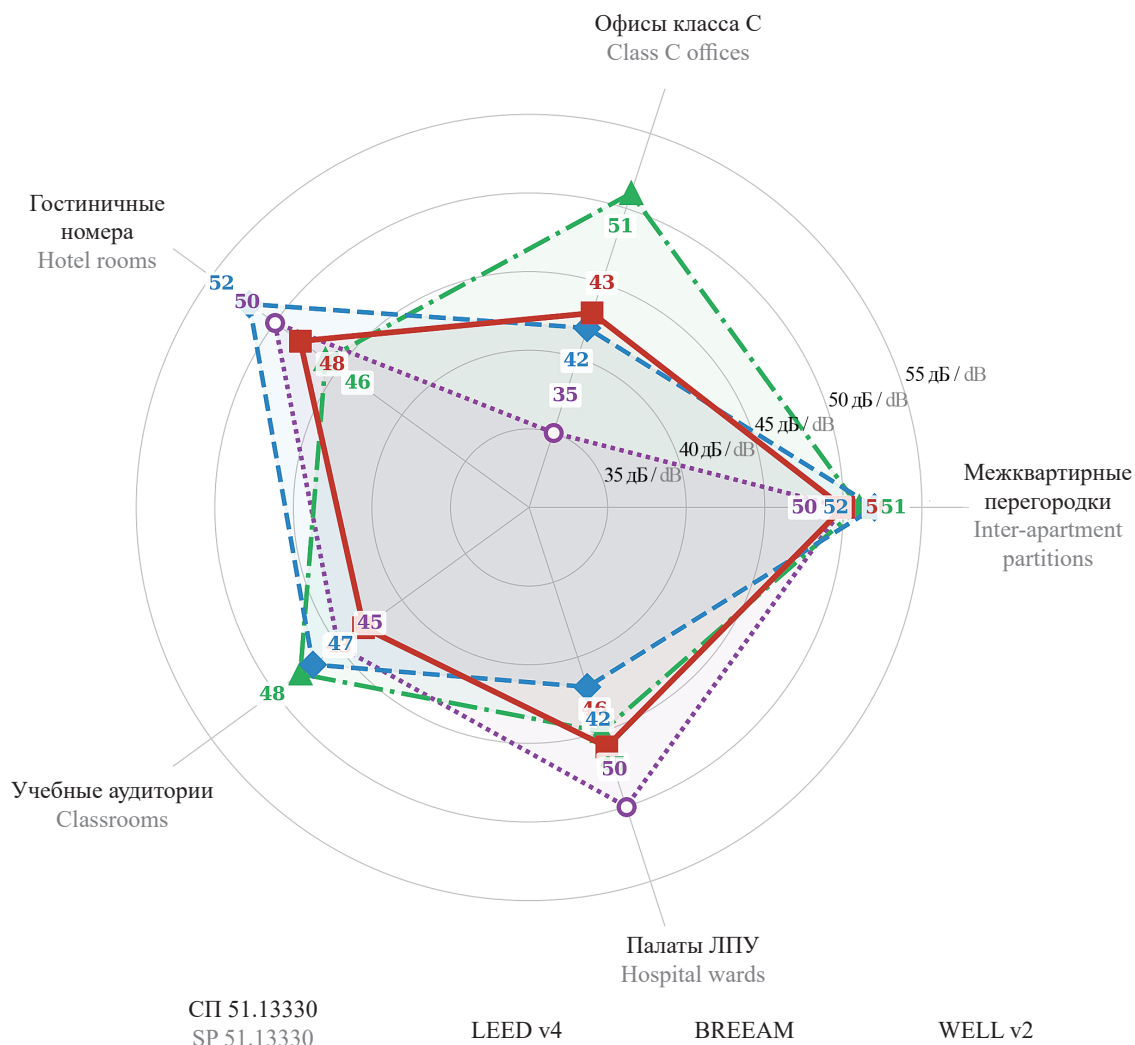


Рис. 2. Сопоставление нормируемых показателей R'_w , дБ, по пяти категориям помещений: СП 51.13330 и международные системы экологической сертификации

Fig. 2. Comparison of standardized indicators R'_w , dB, for five categories of premises: CP 51.13330 and international environmental certification systems

составляет 50 дБА против 55 дБА, согласно российскому своду правил. Кроме того, в целях формирования не только акустически безопасной, но и здоровьесберегающей, стимулирующей рабочей среды в офисных помещениях (включая планировки open space), стандарт WELL регламентирует значительно более строгие значения среднего (эквивалентного) уровня звука L_{eq} по сравнению с отечественными нормами (40 дБА против 50 дБА).

При этом необходимо подчеркнуть высокую степень методологической проработанности и детализации СП 51.13330.2011. В отличие от добровольных «зеленых» стандартов, отечественный предусматривает строгое дифференцирование допустимых уровней шума в зависимости от времени суток (дневное и ночное время) для подавляющего большинства жилых и общественных объектов. В международных системах сертификации подобная градация зачастую отсутствует (например, в системе LEED), а шумовой

режим для ряда специфических помещений не регламентируется.

В табл. 6 приведен сравнительный анализ нормативных требований к изоляции воздушного шума внутренними ограждающими конструкциями согласно СП 51.13330.2011 и критериям экологических стандартов WELL, LEED и BREEAM. Учитывая методологические различия применяемых в документах акустических метрик, для обеспечения сопоставимости результатов все исходные значения были конвертированы в единый индекс изоляции воздушного шума, определяемый в натуральных условиях R'_w .

Полученные результаты в целом согласуются с выводами [15, 16, 23, 24], которые на основе анализа 24 европейских стран зафиксировали аналогичный диапазон требований к межквартирным перегородкам (от 45 до 58 дБ R'_w), отмечено лидерство скандинавских стран и Австрии. Расширение выборки до 43 государств в настоящем исследовании подтверждает

эту закономерность и позволяет дополнительно констатировать, что страны АТР и Африки формируют отдельный кластер с существенно более мягкими требованиями (40–45 дБ), тогда как государства Ближнего Востока занимают промежуточное положение.

Включение в анализ «зеленых» стандартов и систем экологической рейтинговой оценки — новый элемент по сравнению с работами В. Rasmussen и COST Action TU0901 [15, 16]. Результаты показывают, что данные системы, позиционируясь как инструмент повышения качества среды, не во всех категориях устанавливают более строгие требования, чем развитые национальные стандарты. Глубокая типологическая детализация СП 51.13330.2011 является его несомненным преимуществом. Вместе с тем анализ выявил ряд направлений, по которым отечественный стандарт уступает передовой международной практике:

- отсутствие обязательных спектральных поправок. СП нормирует базовый индекс R_w без адаптационных поправок C и C_{tr} , тогда как 14 из 43 стран используют индексы с поправками;
- нормирование расчетного, а не натурального индекса. Для внутренних конструкций СП нормирует R_w , тогда как 27 из 43 стран нормируют натурные

показатели (R'_w или DnT_w), что стимулирует контроль качества строительства;

- категория образовательных учреждений. Российский показатель для учебных аудиторий ($R'_w \geq 43$ дБ) ниже медианы выборки (46 дБ) и значительно уступает требованиям BREEAM (48 дБ) и LEED (47 дБ).

В рамках обсуждения необходимо выделить ряд ограничений настоящего исследования:

1. Фиксированные коэффициенты пересчета ($\pm 2-3$ дБ) являются усредненными и справедливыми для типовых массивных конструкций. Для каркасно-обшивных и легких перегородок погрешность может быть существенно выше.

2. Для ряда стран (Германия, Скандинавия, Канада) сравниваются базовые требования при наличии многоуровневых классификационных систем.

3. Настоящее исследование ограничено воздушным шумом; требования к ударному шуму представляют самостоятельную задачу.

4. Для федеративных государств (США, Канада) приведены общенациональные минимумы, которые могут быть ужесточены на региональном уровне.

Табл. 5. Эквивалентные и максимальные уровни звука проникающего шума в помещениях жилых и общественных зданий
Table 5. Equivalent and maximum sound levels of penetrating noise in residential and public buildings

Назначение помещения Purpose of the premises	Время суток, ч Time of day, h	Уровень звукового давления, дБА / Sound pressure level, dBA							
		Средний (эквивалентный) уровень звука L_{eq} Average (equivalent) sound level L_{eq}				Максимальный уровень звука L_{max} Maximum sound level L_{max}			
		WELL v. 2	LEED	BREEAM	СП 51.13330 CP 51.13330	WELL v. 2	LEED	BREEAM	СП 51.13330 CP 51.13330
Жилые комнаты квартир Apartment living rooms	7:00–23:00	40	35	35	40	50	–	–	55
	23:00–7:00	35		30	30	45	–	–	45
Гостиничные номера до трех звезд Hotel rooms up to 3-star	7:00–23:00	45	35	40	45	55	–	55	60
	23:00–7:00			35	35		–		50
Офисные помещения Office space	–	40	45	40	50	50	50	48	65
Учебные помещения, конференц-залы и читальные залы Educational spaces, conference rooms, and reading rooms	–	45	35	40	40	55	42	50	55
Палаты лечебных учреждений Wards of medical institutions	7:00–23:00	40	35	40	35	50	45	50	50
	23:00–7:00				25				40

Табл. 6. Сравнение показателей нормативных требований изоляции воздушного шума внутренними ограждающими конструкциями R_w по СП 51.13330.2011 «Защита от шума» и R'_w «зеленых» стандартов WELL, LEED и BREEAM

Table 6. Comparison of regulatory requirements for airborne sound insulation by internal enclosing structures R_w according to CP 51.13330.2011 “Noise Protection” and R'_w of WELL, LEED, and BREEAM

Наименование и расположение ограждающей конструкции Name and location of the structure	СП 51.13330 SP 51.13330	WELLv. 2	LEED	BREEAM
<i>Жилые здания / Residential buildings</i>				
Стены и перегородки между квартирами Walls and partitions between apartments	$R_{\text{треб/required}} \geq 52$ $R'_w \geq 50$	$R'_w \geq 50$	$STC_c \geq 55$ $R'_w \geq 52$	$DnT_w + C \geq 48$ $R'_w \geq 53$
между помещениями квартир и офисами between apartments and offices		$STC_c \geq 55$ $R'_w \geq 52$	$STC_c \geq 60$ $R'_w \geq 57$	$DnT_w + C \geq 45$ $R'_w \geq 50$
между помещениями квартир и лестничными клетками, холлами, коридорами, вестибюлями between apartment spaces and stairwells, halls, corridors, vestibules		$STC \geq 50$ $R'_w \geq 47$	$STC \geq 50$ $R'_w \geq 47$	$DnT_w + C \geq 45$ $R'_w \geq 50$
между помещениями квартир и магазинами between apartment buildings and shops	$R_{\text{треб/required}} \geq 57$ $R'_w \geq 55$	$STC_c \geq 60$ $R'_w \geq 57$	$STC_c \geq 60$ $R'_w \geq 57$	$DnT_w + C \geq 45$ $R'_w \geq 50$
между квартирами и ресторанами/кафе/спортзалами between apartments and restaurants/cafes/gyms	$R_{\text{треб/required}} \geq 60$ $R'_w \geq 58$	$STC_c \geq 60$ $R'_w \geq 57$	$STC_c \geq 60$ $R'_w \geq 57$	$DnT_w + C \geq 45$ $R'_w \geq 50$
Перегородки без дверей между комнатами, между кухней и комнатой в квартире Partitions without doors between rooms, between the kitchen and the room in the apartment	$R_{\text{треб/required}} \geq 43$ $R'_w \geq 41$	$STC \geq 45$ $R'_w \geq 42$	–	–
Перегородки между санузлом и комнатой одной квартиры Partitions between the bathroom and the room of one apartment	$R_{\text{треб/required}} \geq 47$ $R'_w \geq 45$	$STC \geq 45$ $R'_w \geq 42$	$STC_c \geq 55$ $R'_w \geq 52$	$R_{\text{треб/required}} \geq 40$ $R'_w \geq 38$
Стены и перегородки между комнатами общежитий Walls and partitions between dormitory rooms	$R_{\text{треб/required}} \geq 50$ $R'_w \geq 48$	$STC_c \geq 55$ $R'_w \geq 52$	–	$DnT_w + C \geq 45$ $R'_w \geq 50$
Входные двери квартир, выходящие на лестничные клетки, в вестибюли и коридоры Entrance doors of apartments leading onto stairwells, lobbies and corridors	$R_{\text{треб/required}} \geq 32$ $R'_w \geq 30$	–	–	$R_{\text{треб/required}} \geq 35$ $R'_w \geq 33$
<i>Гостиницы / Hotels</i>				
Стены и перегородки между номерами: Walls and partitions between rooms: гостиницы категорий «пять звезд» и «четыре звезды»; five-star and four-star hotels;	$R_{\text{треб/required}} \geq 53$ $R'_w \geq 51$	$STC_c \geq 55$ $R'_w \geq 52$	$STC_c \geq 55$ $R'_w \geq 52$	$DnT_w + C \geq 43$ $R'_w \geq 48$
гостиницы категории «три звезды»; three-star hotels;	$R_{\text{треб/required}} \geq 51$ $R'_w \geq 49$			
гостиницы категорий ниже «три звезды» hotels below three stars	$R_{\text{треб/required}} \geq 50$ $R'_w \geq 48$			

Наименование и расположение ограждающей конструкции Name and location of the structure	СП 51.13330 SP 51.13330	WELLv. 2	LEED	BREEAM
Стены и перегородки, отделяющие номера от помещений общего пользования (лестничные клетки, вестибюли, холлы, буфеты) Walls and partitions separating rooms from common areas (stairwells, vestibules, halls, buffets): гостиницы категорий «пять звезд» и «четыре звезды»; five-star and four-star hotels; гостиницы категорий ниже «три звезды» hotels below three stars	$R_{\text{нтрпб}} / \text{required} \geq 53$ $R'_w \geq 51$ $R_{\text{нтрпб}} / \text{required} \geq 51$ $R'_w \geq 49$	$STC_c \geq 55$ $R'_w \geq 52$	$STC_c \geq 50$ $R'_w \geq 47$	$DnT_w + C \geq 43$ $R'_w \geq 48$
Стены и перегородки, отделяющие номера от ресторанов, кафе: Walls and partitions separating rooms from restaurants and cafes: гостиницы категорий «пять звезд» и «четыре звезды»; five-star and four-star hotels; гостиницы категорий ниже «три звезды» hotels below three stars	$R_{\text{нтрпб}} / \text{required} \geq 60$ $R'_w \geq 58$ $R_{\text{нтрпб}} / \text{required} \geq 57$ $R'_w \geq 55$	$STC_c \geq 60$ $R'_w \geq 57$	$STC_c \geq 60$ $R'_w \geq 57$	$DnT_w + C \geq 43$ $R'_w \geq 48$
<i>Административные здания, офисы / Administrative buildings, offices</i>				
Стены и перегородки между кабинетами и отделяющие кабинеты от рабочих комнат Walls and partitions between offices and separating offices from workrooms	$R_{\text{нтрпб}} / \text{required} \geq 45$ $R'_w \geq 43$	$SPP_{\text{min}} \geq 75$ $R'_w \geq 35$	$STC_c \geq 45$ $R'_w \geq 42$	$DnT_w \geq 38$ $R'_w \geq 43$
между кабинетами различных фирм between the offices of different companies	$R_{\text{нтрпб}} / \text{required} \geq 48$ $R'_w \geq 46$	$STC_c \geq 50$ $R'_w \geq 47$	$STC_c \geq 50$ $R'_w \geq 47$	$DnT_w \geq 48$ $R'_w \geq 43$
<i>Больницы и санатории / Hospitals and sanatoriums</i>				
Стены и перегородки между палатами, кабинетами врачей Walls and partitions between wards, doctors' offices	$R_{\text{нтрпб}} / \text{required} \geq 48$ $R'_w \geq 46$	$STC_c \geq 50$ $R'_w \geq 47$	$STC_c \geq 45$ $R'_w \geq 42$	$DnT_w \geq 42$ $R'_w \geq 47$
Стены и перегородки между операционными и отделяющие операционные от других помещений Walls and partitions between operating rooms and separating operating rooms from other rooms	$R_{\text{нтрпб}} / \text{required} \geq 54$ $R'_w \geq 52$	$STC_c \geq 55$ $R'_w \geq 52$	$STC_c \geq 50$ $R'_w \geq 47$	$DnT_w \geq 47$ $R'_w \geq 52$
<i>Образовательные организации / Educational intuitions</i>				
Стены и перегородки между классами, кабинетами и аудиториями и отделяющие эти помещения от помещений общего пользования Walls and partitions between classrooms, offices and auditoriums and separating these spaces from common areas	$R_{\text{нтрпб}} / \text{required} \geq 48$ $R'_w \geq 46$	$STC_c \geq 50$ $R'_w \geq 47$	$STC_c \geq 53$ $R'_w \geq 50$	$DnT_w \geq 43$ $R'_w \geq 48$

Окончание табл. 6 / End of the Table 6

Наименование и расположение ограждающей конструкции Name and location of the structure	СП 51.13330 SP 51.13330	WELLv. 2	LEED	BREEAM
Стены и перегородки между музыкальными классами образовательных организаций среднего общего образования и отделяющие эти помещения от помещений общего пользования Walls and partitions between music classrooms of secondary general education institutions and separating these rooms from common areas	$R_{\text{нтрпб}} / \text{required} \geq 55$ $R'_w \geq 53$	$\text{STC}_c \geq 60$ $R'_w \geq 57$	$\text{STC}_c \geq 60$ $R'_w \geq 57$	$\text{DnT}_{w} \geq 45$ $R'_w \geq 50$
Стены и перегородки между музыкальными классами образовательных организаций высшего образования Walls and partitions between music classrooms at Universities	$R_{\text{нтрпб}} / \text{required} \geq 57$ $R'_w \geq 55$	$\text{STC}_c \geq 60$ $R'_w \geq 57$	$\text{STC}_c \geq 60$ $R'_w \geq 57$	$\text{DnT}_{w} \geq 55$ $R'_w \geq 60$

Дошкольные образовательные организации / Pre-school educational institutions

Стены и перегородки между групповыми комнатами, спальнями и между другими детскими комнатами Walls and partitions between group rooms, bedrooms and between other children's rooms	$R_{\text{нтрпб}} / \text{required} \geq 47$ $R'_w \geq 45$	$\text{STC}_c \geq 50$ $R'_w \geq 47$	$\text{STC}_c \geq 50$ $R'_w \geq 47$	$\text{DnT}_{w} \geq 42$ $R'_w \geq 47$
Стены и перегородки, отделяющие групповые комнаты, спальни от кухонь Walls and partitions separating group rooms, bedrooms and kitchens	$R_{\text{нтрпб}} / \text{required} \geq 52$ $R'_w \geq 50$	$\text{STC}_c \geq 60$ $R'_w \geq 57$	$\text{STC}_c \geq 60$ $R'_w \geq 57$	$\text{DnT}_{w} \geq 52$ $R'_w \geq 57$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный сравнительный анализ нормативной документации 43 государств и трех международных систем экологической рейтинговой оценки зданий (WELL, BREEAM, LEED) позволяет сформулировать следующие выводы:

1. В мировой инженерной практике акустического нормирования применяется не менее семи различных индексов звукоизоляции воздушного шума, базирующихся как на лабораторных (R_w , STC), так и на натуральных (R'_w , DnT_w) методах контроля с различной степенью интеграции спектральных адаптационных поправок (C , C_{tr}).

2. Российские нормативные требования (СП 51.13330.2011) по большинству рассмотренных категорий помещений находятся в диапазоне медианных значений мировой выборки (2–3-й квартили), при этом превышая базовые пороги стран АТР и Америки (40–45 дБ) и уступая лидерам — скандинавским странам и Австрии (55–58 дБ).

3. Сопоставление с критериями WELL, BREEAM и LEED показало, что базовые значения СП 51.13330

сопоставимы, а по ряду категорий (палаты ЛПУ, офисы) превосходят пороги отдельных систем. Исключение — учебные аудитории, для которых международные стандарты устанавливают более высокие требования.

4. Ключевым преимуществом отечественной нормативной базы служит глубокая типологическая детализация по сравнению с укрупненными категориями зеленых стандартов.

5. Направлениями совершенствования СП 51.13330 являются: внедрение обязательных спектральных адаптационных поправок; переход к нормированию натурального индекса R'_w для внутренних конструкций; пересмотр требований для образовательных учреждений в сторону повышения.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на: расширение анализа на ударный шум; кластерный анализ стран по паттернам нормативных требований; изучение корреляции строгости нормативов с социально-экономическими факторами; сравнительный анализ динамики ужесточения акустических нормативов за последние 20 лет.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алихаджиева А.С. Влияние современной экологической обстановки на здоровье людей: правовые аспекты, вызовы и пути решения // Вестник Прикамского социального института. 2024. № 1 (97). С. 15–21. EDN AULXPA.
2. Mu J., Li P., Qin Zh., Feng Y., Zhang Ch. The effects of indoor acoustic and visual environments on the mental health of older adults : a systematic review // Humanities and Social Sciences Communications. 2025. Vol. 12. Issue 1. P. 1716. DOI: 10.1057/s41599-025-05981-8. EDN KDSYZE.
3. Cui P., Li T., Xia Zh., Dai Ch. Research on the Effects of Soundscapes on Human Psychological Health in an Old Community of a Cold Region // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19. Issue 12. P. 7212. DOI: 10.3390/ijerph19127212. EDN XJHFEX.
4. Sailer U., Hassenzahl M. Assessing noise annoyance: An improvement-oriented approach // Ergonomics. 2000. Vol. 43. Issue 11. Pp. 1920–1938. DOI: 10.1080/00140130050174545
5. Banbury S.P., Berry D.C. Office noise and employee concentration: Identifying causes of disruption and potential improvements // Ergonomics. 2025. Vol. 48. Issue 1. Pp. 25–37. DOI: 10.1080/00140130412331311390
6. Bluhm G.L., Berglund N., Nordling E., Rosenlund M. Road traffic noise and hypertension // Occupational and Environmental Medicine. 2007. Vol. 64. Issue 2. Pp. 122–126. DOI: 10.1136/oem.2005.025866
7. Lamb S., Kwok K.C.S. A longitudinal investigation of work environment stressors on the performance and wellbeing of office workers // Applied Ergonomics. 2016. Vol. 52. Pp. 104–111. DOI: 10.1016/j.apergo.2015.07.010
8. Fyhri A., Aasvang G.M. Noise, sleep and poor health: Modeling the relationship between road traffic noise and cardiovascular problems // Science of The Total Environment. 2010. Vol. 408. Issue 21. Pp. 4935–4942. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.06.057
9. Mercugliano A., Corbani A., Bigozzi L., Vettori G., Incognito O. The effects of classroom acoustic quality on student perception and wellbeing : a systematic review across educational levels // Frontiers in Psychology. 2025. Vol. 16. DOI: 10.3389/fpsyg.2025.1586997. EDN SEYIYX.
10. Eriksson L.J. A brief social history of active noise control in ducts // The Journal of the Acoustical Society of America. 1998. Vol. 104. P. 1807. DOI: 10.1121/1.423598
11. Zhao Yu., Yang Q., Yuan P. Analysis of the Acoustic Environment of Typical Residential Areas along a Light Rail Line Based on GIS // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. Issue 1. DOI: 10.1155/2020/4832892. EDN SHKLPF.
12. Lawrence B.T., Heying D., Gruehn D. The Influence of Green Infrastructure on the Acoustic Environment: A Conceptual and Methodological Basis for Quiet Area Assessment in Urban Regions // Conservation. 2025. Vol. 5. Issue 2. P. 22. DOI: 10.3390/conservation5020022. EDN DESUNI.
13. Цукерников И.Е., Шубин И.Л., Невенчанная Т.О. Проектирование защиты от производственного шума // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2017. № 5. С. 1751415. EDN YPDDCT.
14. Никольский В.Н., Осипов Г.Л., Тимофеев А.К. Отечественные и зарубежные нормы по звукоизоляции // Гигиена и санитария. 1960. № 9.
15. Rasmussen B. Sound insulation between dwellings — Requirements in building regulations in Europe // Applied Acoustics. 2010. Vol. 71. Issue 4. Pp. 373–385. DOI: 10.1016/j.apacoust.2009.08.011
16. Rasmussen B., Machimbarrena M. COST Action TU0901 — Building acoustics throughout Europe. Vol. 1. DiScript Preimpresion. 2014.
17. Scholl W., Lang J., Wittstockh V. Rating of Sound Insulation at Present and in Future. The Revision of ISO 717 // Acta Acustica united with Acustica. 2011. Vol. 97. Issue 4. Pp. 686–698. DOI: 10.3813/aaa.918448
18. Hongisto V., Mäkilä M., Suokas M. Satisfaction with sound insulation in residential dwellings — the effect of wall construction // Building and Environment. 2015. Vol. 85. Pp. 309–320. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.12.010
19. Умнякова Н.П., Шубин И.Л., Шмаров И.А., Смирнов В.А. Обеспечение благоприятных условий в палатах инфекционных больниц в условиях пандемии коронавирусной инфекции // Жилищное строительство. 2021. № 3. С. 3–12. DOI: 10.31659/0044-4472-2021-3-3-11. EDN ZOPPDQ.
20. Greenland E., Harvie-Clark Ja., James A., Shield B. Universal acoustic design for schools: An evidence based approach // Applied Acoustics. 2026. Vol. 242. P. 111055. DOI: 10.1016/j.apacoust.2025.111055. EDN DAZPHU.
21. Rasmussen B., Carrascal T., Secchi S. A Comparative Study of Acoustic Regulations for Hospital Bedrooms in Selected Countries in Europe // Buildings. 2023. Vol. 13. Issue 3. P. 578. DOI: 10.3390/buildings13030578. EDN DYSKZX.
22. Mackenzie R., Sean Smith R., Steel C., Mackenzie R. Sound insulation standards in the UK: A decade of change // Canadian Acoustics. 2011. Vol. 39. Issue 3.
23. Adamczyk E., Marsh D.E. Comparison of acoustical standards and guidelines used in the USA, UK and Europe // The Journal of the Acoustical Society of America. 2005. Vol. 118. P. 1841. DOI: 10.1121/1.4778434
24. Telichenko V., Benuzh A., Rud N., Vasilyev M., Kanev N. Indoor and outdoor acoustic comfort for healthy and sustainable living environment design // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2791. P. 050045. DOI: 10.1063/5.0143456

Поступила в редакцию 24 марта 2026 г.

Принята в доработанном виде 31 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 28 апреля 2026 г.

Об авторах: **Валерий Иванович Теличенко** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики, президент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 449402; President@mgsu.ru;

Михаил Дмитриевич Васильев — аспирант; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21; РИНЦ ID: 985517; mick03vasil@mail.ru;

Никита Сергеевич Рудь — руководитель экологического инжиниринга; **Нью иммо сервисиз**; 107140, г. Москва, Верхняя Красносельская ул., д. 3, стр. 2; РИНЦ ID: 1079377; rudbns@gmail.com;

Николай Георгиевич Канев — доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; заведующий лабораторией «Акустика залов»; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21; РИНЦ ID: 126777; Nikolay.Kanev@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Alikhadzhieva A.S. The impact of the modern environmental situation on human health: legal aspects, challenges and solutions. *Bulletin of Prikamsky Social Institute*. 2024; 1(97):15-21. EDN AULXPA. (rus.).
2. Mu J., Li P., Qin Zh., Feng Y., Zhang Ch. The effects of indoor acoustic and visual environments on the mental health of older adults : a systematic review. *Humanities and Social Sciences Communications*. 2025; 12(1):1716. DOI: 10.1057/s41599-025-05981-8. EDN KDSYZE.
3. Cui P., Li T., Xia Zh., Dai Ch. Research on the Effects of Soundscapes on Human Psychological Health in an Old Community of a Cold Region. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022; 19(12):7212. DOI: 10.3390/ijerph19127212. EDN XJHFEX.
4. Sailer U., Hassenzahl M. Assessing noise annoyance: An improvement-oriented approach. *Ergonomics*. 2000; 43(11):1920-1938. DOI: 10.1080/00140130050174545
5. Banbury S.P., Berry D.C. Office noise and employee concentration: Identifying causes of disruption and potential improvements. *Ergonomics*. 2025; 48(1):25-37. DOI: 10.1080/00140130412331311390
6. Bluhm G.L., Berglund N., Nordling E., Rosenlund M. Road traffic noise and hypertension. *Occupational and Environmental Medicine*. 2007; 64(2):122-126. DOI: 10.1136/oem.2005.025866
7. Lamb S., Kwok K.C.S. A longitudinal investigation of work environment stressors on the performance and wellbeing of office workers. *Applied Ergonomics*. 2016; 52:104-111. DOI: 10.1016/j.apergo.2015.07.010
8. Fyhri A., Aasvang G.M. Noise, sleep and poor health: Modeling the relationship between road traffic noise and cardiovascular problems. *Science of The Total Environment*. 2010; 408(21):4935-4942. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.06.057
9. Mercugliano A., Corbani A., Bigozzi L., Vetori G., Incognito O. The effects of classroom acoustic quality on student perception and wellbeing : a systematic review across educational levels. *Frontiers in Psychology*. 2025; 16. DOI: 10.3389/fpsyg.2025.1586997. EDN SEYIYX.
10. Eriksson L.J. A brief social history of active noise control in ducts. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1998; 104:1807. DOI: 10.1121/1.423598
11. Zhao Yu., Yang Q., Yuan P. Analysis of the Acoustic Environment of Typical Residential Areas along a Light Rail Line Based on GIS. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 2020(1). DOI: 10.1155/2020/4832892. EDN SHKLPF.
12. Lawrence B.T., Heying D., Gruehn D. The Influence of Green Infrastructure on the Acoustic Environment: A Conceptual and Methodological Basis for Quiet Area Assessment in Urban Regions. *Conservation*. 2025; 5(2):22. DOI: 10.3390/conservation5020022. EDN DESUNI.
13. Tsukernikov I.E., Shubin I.L., Nevenchannaya T.O. Designing of industrial sound protection. *Memoirs of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*. 2017; 5:1751415. EDN YPDDCT. (rus.).
14. Nikolsky V.N., Osipov G.L., Timofeev A.K. Domestic and foreign standards for sound insulation. *Hygiene and Sanitation*. 1960; 9. (rus.).

15. Rasmussen B. Sound insulation between dwellings — Requirements in building regulations in Europe. *Applied Acoustics*. 2010; 71(4):373-385. DOI: 10.1016/j.apacoust.2009.08.011
16. Rasmussen B., Machimbarrena M. *COST Action TU0901 — Building acoustics throughout Europe. Vol. 1. DiScript Preimpresion*. 2014.
17. Scholl W., Lang J., Wittstockh V. Rating of Sound Insulation at Present and in Future. The Revision of ISO 717. *Acta Acustica united with Acustica*. 2011; 97(4):686-698. DOI: 10.3813/aaa.918448
18. Hongisto V., Mäkilä M., Suokas M. Satisfaction with sound insulation in residential dwellings — the effect of wall construction. *Building and Environment*. 2015; 85:309-320. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.12.010
19. Umniakova N.P., Shubin I.L., Shmarov I.A., Smirnov V.A. Ensuring favorable conditions in the wards of infectious diseases hospitals in the context of a coronavirus pandemic. *Housing Construction*. 2021; 3:3-12. DOI: 10.31659/0044-4472-2021-3-3-11. EDN ZOPPDQ. (rus.).
20. Greenland E., Harvie-Clark Ja., James A., Shield B. Universal acoustic design for schools: an evidence based approach. *Applied Acoustics*. 2026; 242:111055. DOI: 10.1016/j.apacoust.2025.111055. EDN DAZPHU.
21. Rasmussen B., Carrascal T., Secchi S. A Comparative Study of Acoustic Regulations for Hospital Bedrooms in Selected Countries in Europe. *Buildings*. 2023; 13(3):578. DOI: 10.3390/buildings13030578. EDN DYSKZX.
22. Mackenzie R., Sean Smith R., Steel C., Mackenzie R. Sound insulation standards in the UK: A decade of change. *Canadian Acoustics*. 2011; 39(3).
23. Adamczyk E., Marsh D.E. Comparison of acoustical standards and guidelines used in the USA, UK and Europe. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2005; 118:1841. DOI: 10.1121/1.4778434
24. Telichenko V., Benuzh A., Rud N., Vasilyev M., Kanev N. Indoor and outdoor acoustic comfort for healthy and sustainable living environment design. *AIP Conference Proceedings*. 2023; 2791:050045. DOI: 10.1063/5.0143456

Received March 24, 2026.

Adopted in revised form on March 31, 2026.

Approved for publication on April 28, 2026.

BI O N O T E S : **Valeriy I. Telichenko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction of Thermal and Nuclear Energy Facilities, President; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 449402; President@mgsu.ru;

Mikhail D. Vasiliev — postgraduate student; **Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 21 Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; ID RSCI: 985517; mick03vasil@mail.ru;

Nikita S. Rud — Head of Environmental Engineering; **New Immo Services**; builg. 2, 3 Verkhnyaya Krasnoselskaya st., Moscow, 107140, Russian Federation; ID RSCI: 1079377; rudbns@gmail.com;

Nikolay G. Kanev — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Head of the laboratory "Acoustics of halls"; **Scientific Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)**; 127238, Moscow, Locomotive Passage, 21; ID RSCI: 126777; Nikolay.Kanev@mail.ru.

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

The authors declare no conflict of interest.

Требования работодателей как инструмент управления персоналом в современных строительных организациях

Татьяна Николаевна Магера¹, Сяохань Цюй²

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

² *Шеньянский технологический институт; г. Фушунь, Китайская Народная Республика*

АННОТАЦИЯ

Введение. Согласно цели исследования, на основе глобальных мировых тенденций, специфических особенностей современных строительных организаций выявлены гибкие навыки, востребованные сегодня работодателями в мировой строительной отрасли. Задействовались реальные источники информации: порталы по поиску работы по всему миру. Изучено более ста сайтов, более тридцати использованы для сбора данных. Прежде характеристики мирового и отраслевого уровней в контексте управления персоналом через конкретные персональные качества соотнесены не были. Выяснилось, что умение работать в команде отнюдь не единственный гибкий навык, востребованный в настоящее время в строительстве. В связи с этим можно сделать вывод об актуальности развития гибких навыков у сотрудников и руководителей строительных организаций.

Материалы и методы. Применен библиографический метод, в том числе сбор и анализ данных с сайтов работодателей по всему миру, международных порталов по трудоустройству по отобранным критериям. Проведено обобщение, сформулированы выводы.

Результаты. К мировым тенденциям относятся семь трендов, к отраслевым тенденциям — шесть трендов. Индивидуальные качества сотрудников в таких условиях предполагают наличие семи гибких навыков, представленных обобщенно. Умение работать в команде и коммуникативные навыки чаще упоминаются работодателями. По сравнению с предыдущими исследованиями появились требования, связанные с адаптивностью, психической гибкостью, участилось упоминание о качествах, показывающих ценностную ориентацию на людей в работе.

Выводы. Поликультурный аспект управления персоналом, быстрая смена условий функционирования отрасли, организации, проектная форма работы в командах не утрачивают своей актуальности, становятся иными под влиянием геополитических факторов. Вектор усилий подразделений по управлению персоналом удерживается на оптимизации взаимодействия между представителями различных субкультур, приверженности организации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мировые тренды, строительная отрасль, управление персоналом в строительстве, требования работодателей, востребованные качества, гибкие навыки, оптимизация взаимодействия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Магера Т.Н., Цюй С. Требования работодателей как инструмент управления персоналом в современных строительных организациях // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 801–820. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.801-820

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Николаевна Магера, mageratiana@mail.ru.

Employer requirements as a personnel management tool in modern construction organizations

Tatiana N. Magera¹, Xiaohan Qu²

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

² *Shenyang Institute of Technology; Fushun, People's Republic of China*

ABSTRACT

Introduction. According to the purpose of the study, soft skills in demand by modern employers in the global construction industry were identified. Real sources of information were used. More than a hundred sites have been studied, more than thirty have been used to collect data. Previously, the characteristics of the global and industry levels in the context of personnel management were not correlated through specific personal qualities. The study found: teamwork is not the only soft skill in demand in modern construction. In this regard, we can conclude that it is important to develop soft skills of personnel in construction organizations.

Materials and methods. The bibliographic method was used, which includes collecting, analyzing, and summarizing data from websites of employers around the world in accordance with selected criteria.

Results. There are seven global trends affecting the world; six industry trends. The individual qualities of employees suggest the presence of seven soft skills, presented in a generalized way. Teamwork, communication skills are most often mentioned by employers. Adaptability is sought after, and qualities that demonstrate a value-based orientation toward people at work are also frequently mentioned.

Conclusions. The multicultural aspect of personnel management, the rapid change in the operating conditions of the industry, the organization do not lose their relevance, but become different under the influence of geopolitical factors. The vector of efforts of representatives of HR departments is also focused on optimizing interaction between representatives of various subcultures and the commitment to the organization.

KEYWORDS: global trends, construction industry, personnel management in construction, employer requirements, sought-after qualities, soft skills, interaction optimization

FOR CITATION: Magera T.N., Qu C. Employer requirements as a personnel management tool in modern construction organizations. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):801-820. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.801-820 (rus.).

Corresponding author: Tatiana N. Magera, mageratatiana@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Более ста лет проблема управления в целом и проблема управления персоналом в частности разрабатывается в научной литературе. Есть мнение, что устоявшийся классический подход не отвечает требованиям динамично меняющегося мира, как и утопическое стремление придать стабильную определенность, исчерпывающую предсказуемость процессам жизнедеятельности человека. Трансформируясь соответственно обстоятельствам окружающей среды, система управления персоналом сталкивается с новыми вызовами. При этом строительные организации имеют собственные отличительные характеристики, как и текущие условия функционирования отрасли. От современных особенностей отрасли через специфику строительных организаций и связанные с ней индивидуальные, персональные характеристики человека на основе понимания эффективности поставлена цель выявить актуальные особенности управления персоналом.

Попытки выявить, систематизировать и комплексно описать глобальные характеристики современного и будущего мира, отражающиеся на функционировании отрасли, организаций и каждом конкретном человеке, предпринимались неоднократно¹. Цели устойчивого развития являются мировым трендом². При этом глобальные вызовы специфичны для отдельных стран. Поэтому и политика (включая технологическую) должна быть специализирована под конкретные потребности стран-участников и важнейших секторов, компаний¹. Наиболее часто упоминаемые характеристики мира, значимые для данной работы: глобальная интеграция экономик и обществ, урбанизация, волны массовой миграции, поликультурность и субкультурная неоднородность, демографический фактор в целом, внедрение технологий четвертой промышленной революции и предвосхищение пятой промышленной революции [1], изменение характера конфликтов на всех уровнях [2] и др. С психологической

точки зрения действия человека обусловлены наличной картиной мира или моделью происходящего. Эта модель создает образ реальности, объясняет явления и позволяет прогнозировать будущие события. Это основа для выработки комплекса мер: обустройства быта, налаживания производства, подготовки к грядущим событиям, выбора партнеров и т.д. Разработка единой последовательной и непротиворечивой модели мира — процесс сложный. Распространение, хоть и не бесспорно принятое в научном сообществе, получила модель VUCA-мира, предшествующих ему и последующих вариантов моделей, являющихся попыткой объяснить происходящее, подготовить общество к будущему через формирование и развитие у себя необходимых способностей, профессиональных и личностных качеств [2, 3].

В части цифровой трансформации ориентиры во многом были определены авторами работ, в которых описаны особенности внедрения Индустрии 4.0 (технологии четвертой промышленной революции) и соответствующих технологий, процесс перехода на Индустрию 4.0 и его последствия, критерии и этапы такого перехода, проанализирован уровень развития организаций по предложенным критериям [4–8]. Таких технологий двенадцать и они связаны с расширением цифровых технологий, преобразованием физического мира, изменением человека и интеграцией окружающей среды: вычислительные технологии; блокчейн и технологии распределенного реестра; интернет вещей; искусственный интеллект и роботы; передовые материалы; аддитивное производство и многомерная печать; био- и нейротехнологии; виртуальная и дополненная реальность; получение, накопление и передача энергии; геоинженерия; космические технологии [8]. Технологии информационного моделирования, которые с 2018 г. под контролем государства продвигаются в строительстве, служат примером внедрения технологий четвертой промышленной революции в конкретную отрасль³.

¹ Технологии-2040: от неопределенностей к стратегии. URL: http://www.forecast.ru/_ARCHIVE/Presentations/DBelousov/2023_07-30HorN.pdf

² Цели в области устойчивого развития. URL: [ustainedevelopment.ru/sustainable-development-goals/](https://sustainabledevelopment.ru/sustainable-development-goals/)

³ О первоочередных задачах по модернизации строительной отрасли и повышению качества строительства : Поручение от 19.07.2018 № Пр-1235. 2018. URL: <https://docs.cntd.ru/document/550966183>

Сегодня российские строительные организации испытывают на себе влияние полного спектра факторов внешнего воздействия, среди которых санкции часто рассматриваются в первую очередь. Направленные на ограничения и усложнение работы финансовой системы, некоторых отраслей экономики РФ, санкции вместе с тем способствуют разработке и производству отечественного оборудования, а также созданию оригинальных решений на базе доступной компонентной базы. Это стимулирует реавтоматизацию производства и создание импортозамещающих аналогов или более совершенных устройств, механизмов и роботов, что соответствует показателям продвижения по пути технологического развития. На современную строительную отрасль также влияет снижение покупательной способности населения, вызванное ростом ипотеки, что обозначило изменение конъюнктуры рынка. Увеличение объема малоэтажного и индивидуального строительства диктует необходимость производства домокомплектов, которые могут перемещаться за строящимися объектами (мобильные производственные площадки) [9], расширяется рынок модульного строительства. Глобальные миграционные тенденции также сказываются на составе строительной отрасли, наделяя ее характеристиками поликультурности с присущими ей разнообразием и при этом разрозненностью и нестабильностью. Кроме того, усложнение геополитической обстановки ставит перед отраслью проблемы, связанные с кадровым составом (набором, удержанием, мотивацией).

С целью обеспечения качественной работы строительной отрасли ведется активная работа по совершенствованию законодательства в строительной отрасли и сфере ЖКХ. На сайте Минстроя России опубликованы ключевые изменения в нормативном регулировании сфер строительства и ЖКХ в 2025 г. Отмечено, что в 2024 г. было принято 228 актов, в том числе 30 федеральных законов, 122 правительственных акта и 76 приказов Минстроя России. В 2025 г. Минстрой России совместно с Государственной Думой и Советом Федерации продолжает держать курс на современное и эффективное законодательство⁴. В Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года особое внимание уделяется профессиональной трансформации как составляющей кадрового, научного и ресурсного обеспечения строительной отрасли⁵.

⁴ Ключевые изменения в нормативное регулирование сфер строительства и ЖКХ в 2025 году // Минстрой России. 2025. 22 января. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/press/klyuchevye-izmeneniya-v-normativnoe-regulirovanie-sfer-stroitelstva-i-zhkhk-v-2025-godu/>

⁵ Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года. 2022. 31 октября. URL: <http://static.government.ru/media/files/AdmXczBBUGfGNM8tz16r7RkQcsgP3LAM.pdf>

Преобразования на всех уровнях от мирового, глобального до индивидуального модифицируют уклад жизни человека и его самого, что провоцирует сосредоточение внимания на человеческом факторе. Кадры, ресурсы, потенциал, персонал достаточно подробно определены и исследуются, как и человеческий фактор. Социальный и социально-психологический аспект управления уже на первых этапах истории развития управления персоналом как науки обуславливал ее содержательный компонент. Контакты (или их отсутствие) между работниками и администрацией, конфликты и способы их разрешения, предупреждения, настроения работников, их вовлеченность и мотивация, оптимизация взаимодействия между подразделениями компании и многие другие социально-психологические составляющие управления выявились как значимые. Это стало отправной точкой для привлечения специальных лиц, профессионалов, а впоследствии отделов или подразделений, выполняющих функции управления персоналом. Перечисленные выше отличительные особенности меняющегося мира и отрасли привносят в деятельность таких подразделений необходимость соответствовать обновляющимся условиям внешней среды. Например, профессиональные требования к кандидатам и соискателям на вакантные должности уже давно предполагают наличие информационной грамотности и владение необходимыми программами, все чаще включают такие персональные качества, как адаптивность и столь противоречивую с психологической точки зрения многозадачность. Обучение и развитие, как функциональная часть деятельности подразделений по управлению персоналом, также трансформировались. Периоды между курсами прохождения повышения квалификации сократились, сроки и тематика разнообразились и приумножились, контроль ужесточился.

Отраслевая специфика, как и своеобразие деятельности отдельно взятой организации, отражается в корпоративной и организационной культуре соответственно. В классификации организационных культур Т. Парсонса, основанной на социальных эталонных переменных и включающей четыре типа организационных культур, две переменные определяют поведение члена организации через ценности и взаимоотношения [10]. Ч. Хэнди, основываясь на работах Роджера Харрисона, также описал четыре типа организационных культур. Ориентации классификации Ч. Хэнди представлены личностью, властью, ролью и задачей [11]. Ф. Тромпенаарс по критериям Т. Парсонса описал типы организационных культур на основе национальных культурных особенностей поведения [12]. К. Камерон и Р. Куинн классифицировали типы и их характеристики, предложили конкретные рекомендации по изменениям организационной культуры [13]. В связи с миграционными тенденциями и поликультурностью состава строительной отрасли необходимо упомянуть типологию Г. Хофстеде, в которой национальная культура и социально-демографические

особенности определены как причины поведенческих различий членов организации [12]. Для строительной отрасли характерна организационная культура результата [12, 13].

В строительной отрасли за период внедрения цифровизации и информатизации наблюдается постепенное приспособление к новым реалиям по сравнению с 2018 г. [14]. Управление персоналом, как профессиональная деятельность по использованию различных групп персонала организации для достижения необходимого уровня организационно-экономических и социально-психологических целей, не является исключением. Эффективность (экономическая, социально-психологическая, материальная, социальная и др.) данного подразделения предполагает адаптируемость, прибыльность, стабильность. Если экономическая эффективность нацелена на экономические результаты компании с минимальными затратами на персонал, то социально-психологическая эффективность выражается в удовлетворенности трудом и пребыванием на предприятии, социальная — на достижение индивидуальных и групповых целей персонала, связана с направленностью на работу и отношениями с людьми [15]. Организационно-экономическая эффективность подразумевает результаты деятельности, материальную и нематериальную отдачу производства [16, 17].

В трудах специалистов в области управления внимание уделяется стратегическому менеджменту. Его актуальность в реалиях сегодняшнего дня связана с восприятием человеческих ресурсов как стратегических, а также с пониманием необходимости согласования стратегических целей компании со стратегией управления персоналом, согласованности всех бизнес-процессов. И. Ансофф предложил базовые понятия и алгоритм осуществления стратегического анализа, где внешняя среда («внешняя турбулентность») компании, роль индивида, групп, непредсказуемость будущих событий и так далее учитываются в целостной модели [18]. Б.В. Артамонов комплексно исследовал данный вопрос в деятельности российских авиапредприятий [19]. Среди отечественных ученых В.М. Архипов первым, еще в советское время, поставил вопрос о необходимости разработки стратегического плана на крупных промышленных предприятиях [20]. Т.Ю. Базаров разрабатывает социально-психологические методы и технологии управления персоналом организации на основе социально-психологического подхода [21]. О.С. Виханский изучает стратегическое управление наряду с лидерством, бизнес-образованием [22]. Б.Г. Литвак пристальное внимание уделяет не только решениям стратегического характера, но и вопросам стратегического управления инновациями, цепочке создания стоимости и определению ключевых факторов успеха [23]. У Ю.Г. Одегова работы посвящены эффективности и оценке качества тру-

довой жизни на предприятии [24]. А.Л. Журавлев разрабатывал технологии работы и управления персоналом в современных условиях [25].

Обобщая работы авторов перечисленных трудов сообразно предметной области исследования, обнаруживаются такие критерии эффективности управления персоналом, как укомплектованность; соотношение численности службы персонала к общей численности организации; текучесть персонала организации; автоматизация процесса управления персоналом; удовлетворенность трудом; отношения «начальник – подчиненный» (порядок вознаграждения, увольнения, отпуска, отгулы) [16].

Эффективность определяется как результативность и как действенность, полезность [26]. По сути это баланс результатов и затраченных на их достижение ресурсов. Социальные психологи «качество жизни трудового коллектива» дополняют в виде критерия результативности [24]. Стоит отметить, что единой системы измерения не существует, условным ориентиром является баланс результативности и затрат при выполнении целей [24, 26]. Каждая организация разрабатывает и использует свою систему оценки эффективности, акцентируясь на собственных целях и требованиях. Об этом также упоминал И. Ансофф, подвергая критике универсальные правила для развития компаний [18].

Внутриорганизационная специфика, внутриорганизационный дизайн отражают своеобразие состава и деятельности отдельно взятой компании. Точкой входа к изучению, построению, управлению целостной системы внутриорганизационных процессов у разных авторов становятся стили управления, лидерство, система мотивации персонала, вовлеченность и т.д. Например, динамичные корпоративные условия восполнили заметно не хватающие в литературе всесторонние систематические обзоры, которые изучают взаимосвязь между вовлеченностью сотрудников и стилями лидерства, а также то, как эти факторы взаимодействуют, чтобы повлиять на производительность сотрудников [27]. Теория социального обмена, предложенная социологами, представляет собой важную теоретическую основу, используемую для понимания механизмов, посредством которых действует вовлеченность сотрудников [28]. Дж. Хоманс, автор теории, показал основу человеческого взаимодействия, которая представлена взаимной выгодой [29]. Если эффективность определять как сумму всех результатов, произведенных индивидуумом, то польза извлекается в случае удовлетворения потребностей сторон (коллег, руководителя и подчиненного, организации и персонала) [30]. Также эффективность работы сотрудников можно определить как комплексную оценку способностей, навыков и достижений отдельного человека на рабочем месте. Это включает оценку того, насколько хорошо сотрудник выполняет должностные обязанности, соответствует

или превосходит ожидания и вносит вклад в общий успех организации [31, 32].

Понятие «воспринимаемой эффективности» основывается на организационной эффективности [33–37], которая означает общую эффективность, результативность и достижение целей и задач организации. Производительность сотрудников — важный элемент организационной производительности, напрямую влияющий на коллективный результат, производительность и организационный успех [38]. С организационной точки зрения эффективность работы сотрудников рассматривается как коллективный вклад всех сотрудников в достижение стратегических целей и задач компании. Связывая индивидуальные достижения с общими стратегическими целями организации, воспринимаемая производительность предлагает призму, через которую можно оценить соответствие между индивидуальным вкладом и организационными результатами [39]. Исследования индивидуального вклада в результативность достижения организационных целей приводит к изучению феномена лидерства.

В условиях динамично меняющегося мира все чаще в публикациях встречается термин «трансформационное лидерство», которое повышает вовлеченность, а следовательно, производительность и позитивное поведение [40, 41]. Трансформационное лидерство в организационной психологии противопоставляется подходу к работе ради выгоды только материальной или связанной с тщеславными амбициями. Так, вместо поощрений и наказаний, стимулирующих достижение целей, мотивирующими факторами становятся высшие идеалы и нравственные ценности, совместные интересы (лидера и его последователей); вместо поддерживающего работоспособность стресса трансформационная модель предлагает использовать индивидуальный подход, творчество и инновации [42].

Деятельность по управлению персоналом в строительных компаниях неизбежно сталкивается с необходимостью учета человеческого фактора еще и по причине практически повсеместного применения командной работы, связанной с реализуемыми проектами. Проектные команды создаются и существуют весь временной период, предусмотренный на исполнение целей проекта. Сообразно этапам динамики развития команды такая деятельность сопряжена со спецификой социальной адаптации, особенностями оптимизации внутригруппового взаимодействия. Таким образом, к упомянутым выше тенденциям мирового и отраслевого уровня, необходимыми для рассмотрения становятся способности конструктивного социального взаимодействия, относящиеся к надпрофессиональным или «гибким навыкам».

Более двадцати лет проблеме формирования и развития гибких навыков посвящены работы, дискуссии в научной, профессиональной теории и практике. В настоящее время эта проблематика

не потеряла своей актуальности. Ведутся разработки по формированию гибких навыков у студентов вузов [42, 43], выявляются и описываются гибкие навыки в разных сферах профессиональной деятельности. Например, предпринимательская деятельность затребуется самостоятельности (принятие решений при отсутствии вышестоящего руководства, психическая пластичность, решительность и т.д.). Для строителей, как показало данное исследование, даже на линейном уровне такие гибкие навыки крайне востребованы [44]. Гибким навыкам часто отдается приоритет, но все также их практически невозможно формально оценить, сформировать четкий алгоритм развития в виде образовательной программы с указанными индикаторами и этапами формирования. Кроме того, в строительстве скорее идут разговоры о гибких навыках, нежели уделяется реальное внимание при подготовке. Соответствующие учебные дисциплины в профессиональных образовательных учреждениях, осуществляющих подготовку специалистов строительной отрасли, выступают в роли второстепенных, своего рода факультативами, преподавателями технических предметов воспринимаются как несерьезные, что сказывается на отношении к ним студентов, а значит, демотивирует, снижает их ценность в глазах обучающихся. Тем не менее эта работа ведется, составляются реестры гибких навыков и рейтинги для конкретных профессий, отраслей [45].

Профессиональные («жесткие навыки») по понятным причинам значимы. Умение «читать чертежи», «рассчитывать несущие конструкции», «согласовывать проектную документацию» и другие требования работодателей необходимы для решения рабочих задач. При этом в автономном режиме реализовать такие задачи не представляется возможным. Многочисленная по составу сфера профессиональной деятельности помещает сотрудника в социальный контекст, поликультурная компонента делает этот контекст неоднородным и многогранным в своих социально-психологических проявлениях, изменчивость условий труда и взаимодействия, смена состава группы и рабочих площадок приводят к необходимости применения конкретных гибких навыков. Для студентов, начинающих и опытных работников, руководителей строительной отрасли важны аргументы — мотивирующие факторы для овладения гибкими навыками. Такие аргументы способны стать инструментами подразделений по управлению персоналом в строительной отрасли при найме и развитии персонала.

В связи с динамичными изменениями в мире и строительной отрасли в частности, необходимо определением соответствия прилагаемых строительными организациями усилий по повышению эффективности деятельности в текущих условиях через работу с персоналом, а также для сохранения намеченного вектора в будущем актуальной целью

данного исследования является определение уместности развития гибких навыков у представителей строительной отрасли посредством сбора и анализа требований работодателей.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1) на основе глобальных тенденций и современных особенностей строительной отрасли проследить за смещением акцентов в списках актуальных гибких навыков, выступающих индикаторами при найме и развитии персонала строительных организаций;

2) провести сбор и анализ данных с сайтов работодателей по всему миру по критерию востребованности гибких навыков и их наименований;

3) сформулировать выводы о востребованности гибких навыков в строительной отрасли для эффективной деятельности подразделений по управлению персоналом современных строительных организаций.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В процессе исследования особенностей управления персоналом в современных строительных организациях применялся библиографический метод, изучались научные труды отечественных и зарубежных авторов по социальной психологии, организационной психологии, менеджменту, экономике, психологии управления, управлению персоналом, социологии; публикации по данной теме, официальные документы о состоянии и перспективах развития строительной отрасли РФ; проводились сбор и анализ информации с сайтов работодателей по всему миру, международных порталов по трудоустройству. Критериями отбора информации из указанных интернет-источников являются: охват максимального количества регионов мира, принадлежность работодателя к строительной отрасли своей страны (строительство, архитектура, недвижимость, ЖКХ), наличие подробных требований работодателя к соискателю на вакантную должность, вакантные должности подразумевают квалифицированный труд (разнорабочие для работы на строительных площадках исключались). Проведено обобщение, сформулированы выводы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

К мировым тенденциям, сказывающимся на жизни отраслей, организаций, людей, относятся глобальная интеграция/дизинтеграция экономик и обществ, урбанизация, волны массовой миграции, поликультурность и субкультурная неоднородность, демографический фактор в целом, цифровизация и информатизация, изменение характера конфликтов на всех уровнях. К отраслевым тенденциям относятся экономические ограничения (санкции) и их последствия, изменение конъюнктуры рынка, мобильные производственные площадки, многочислен-

ность и поликультурность состава, геополитические факторы, проблема соответствия системы управления персоналом текущим и будущим вызовам. Индивидуальные качества сотрудников в таких условиях предполагают наличие коммуникативных способностей; адаптивность; социальную чуткость; психическую гибкость, пластичность; умение адекватно действовать в конфликтных ситуациях; способность управлять своим психоэмоциональным состоянием. Индивидуальные качества представлены обобщенно.

При этом качество специалистов формулируется работодателями. Следует соотнести обобщенные индивидуальные качества, востребованные миром, с реальными требованиями работодателей для дальнейшего их учета в процессе подготовки специалистов строительной отрасли. Проанализирован контент на ряде международных порталов по трудоустройству (Getwork, HeadHunter, Indeed, LinkedIn, SuperJob), что позволило составить портреты представителей разных профессиональных субкультур в строительстве, отобрать первичную информацию по профессиональным и личным качествам работников, востребованных на мировом рынке труда. Результаты прежних исследований послужили стартовой площадкой для данной работы [2]. Для расширения представления об особенностях управления персоналом в современных строительных организациях работа продолжается. За два года интернет-пространство преобразилось, многие сайты закрывают доступ для запросов с территории РФ или требуют обязательной регистрации (например, LAYBOARD.com, Indeed, LinkedIn и др.). Из списочного массива порталов и сайтов около 40 % остались не охваченными по таким причинам. Тем не менее протяженное по времени исследование показало красноречивые результаты, соответствующие поставленным целям.

Обзор сайтов поиска работы был начат с универсальных сайтов: Indeed, LinkedIn, Glassdoor, Monster, Eurojobs, EURES, Stepstone, Jobsite. Отдельно изучались сайты по поиску работы за границей, предусматривающие временную, дистанционную и полную занятость для граждан, сменивших страну проживания: Careerjet, Layboard, Overseas Jobs; на сайте Idealist размещены социальные и гуманитарные вакансии, вакансии в IT-сфере из различных отраслей предложены на сайте для релокантов Relocate.me, The Local — платформа для англоговорящих соискателей, GoAbroad, своя подборка вакансий сформирована Гугл на Google for Jobs, UN Jobs, Anywhere Work (агрегатор сезонной работы за границей), Snaphunt и др. Помимо требований отечественных работодателей, результаты исследования охватили контрастные по своей культуре и географическому расположению страны, как Германия, Польша, Великобритания, Франция, Италия, Испания, США, Аргентина, Китай, Индия, Ангола.

Вакансии, элементы корпоративной (организационной) культуры, требуемые гибкие навыки намеренно указаны в точном соответствии с текстом на сайтах. Подробное описание вакансий не дается в связи с акцентом исследования, который заключается в специфике требований к соискателю, именно к его персональным качествам, указанным в графе «Гибкие навыки». Корпоративная (организационная) культура или ее элементы часто представлены в части описания компании, расположенной на странице вакансии. Данный раздел создает представление о позиционировании компании, ориентирует на ее ценности, позволяет сформировать впечатление о себе (табл.).

Данные, приведенные в таблице, показывают, что работодатели в разных регионах мира не ограничиваются в своих требованиях к соискателям на вакантные должности коммуникативными навыками и ответственностью. Коммуникативные навыки и схожие с ними (общительность; эффективные навыки письменного и устного общения; люди, которым нравится общаться и взаимодействовать с людьми) не указаны в четырех позициях из тридцати трех. Ответственность и схожие качества (обязательность, надежность, организованность, точность, структурированный и внимательный подход к работе), указывающие на отношение к делу, встречаются реже, в 11 случаях. Однако косвенно на отношение к работе указывают другие требования (например, умение организовать работу, команду). Ожидаемыми стали и качества, связанные с лидерством, стрессоустойчивостью и умением работать под давлением, командной работой. Лидерские навыки востребованы на шести позициях, при этом подсчет велся именно лидерских навыков, лидерство понимается как самостоятельное явление и феномен, не учтены в данном случае опыт управления и организационные навыки. Стессоустойчивость и все качества, свидетельствующие о грамотном эмоциональном самоуправлении, такие как сильная способность выдерживать давление, способность к самоуправлению, навыки управления стрессовыми ситуациями, умение сохранять спокойствие, жизнерадостность, способность работать в условиях дефицита времени, упоминались в описании требований в семи случаях. Навыки командной работы были названы в 21 позиции. Необходимость обладать адаптивностью и психической гибкостью (умение эффективно работать в быстро меняющейся среде, умение адаптироваться к изменениям и развитию проектов, владение реальными навыками адаптации, динамизм) упоминаются на пяти позициях. Направленность на людей представлена во всем разнообразии возможных формулировок: реагирующий на потребности клиентов; способность выстраивать прочные и эффективные рабочие отношения; умение устанавливать профессиональные отношения и коммуникации с клиентами, коллегами и руководством; нравится

общаться и взаимодействовать с людьми; ориентированное на обслуживание клиентов отношение; умение сотрудничать; способность устанавливать эффективные отношения с клиентами, поставщиками и субподрядчиками; отзывчивость; способность вызывать доверие; «приоритет человеческим качествам и навыкам межличностного общения, которые имеют решающее значение»; отличные межличностные навыки; опыт эффективного взаимодействия с регулирующими органами и внешними аудиторами; открытость. Направленность на людей представлена в требованиях работодателей в 12 случаях. При этом поликультурность организации (в широком понимании поликультурности с учетом субкультур) и связанные с ней требования работодателей замечены в текстах десяти вакансий: умение адаптироваться к различным культурам и стилям управления, взаимодействие с представителями разных подразделений и профессиональных групп.

Редкостью являются такие персональные качества, как предпринимательское мышление (позиции 1, 2 «Менеджер по строительству. Управление проектами», «Планировщик проектов», Германия), предприимчивость (позиция 24 «Агент по недвижимости», Аргентина), что может быть обусловлено деятельностью, предусмотренной указанной должностью. Персональные качества приверженность делу (позиция 3 «Менеджер по строительству», Германия), высокая степень приверженности (позиция 5 «Менеджер проектов по развитию недвижимости», Германия), страсть и искренний интерес к отрасли (позиция 7 «Инженер-строитель», Польша), страсть к технологиям: искренний интерес к инновациям (позиция 15 «IT-специалист», Италия), преданность делу (позиция 24 «Агент по недвижимости», Аргентина), наличие командного духа и профессиональной этики (позиция 25 «Инженер-теплотехник», Китай), проактивная позиция (позиция 30 «Старший инженер-строитель», Ангола) обладают эмоциональным акцентом, но при этом носят абстрактный характер. Возникает вопрос о возможностях идентификации таких гибких навыков, их измерения и определения критериев развития. Критерием может выступать как время, проводимое на месте работы или уделяемое взаимодействию дистанционно, так и внешние атрибуты приверженности компании, делу или лояльности. Этот вопрос пока остается открытым, подробная информация в общедоступных источниках работодателя отсутствует.

Высокая личная культура — персональное качество, указанное на позиции 8 «Инженер-строитель», Польша, единожды упомянуто в результатах исследования. При этом компания-работодатель презентует себя выказывающей заботу «о положительном имидже компании», что способно объяснить требование. Нетрадиционно сформулировано требование «темперамент бизнес-лидера» на позиции 12 «Консультант по сделкам с недвижимостью»,

Требования работодателей
 Employers' requirements

Номер Number	Сайт Website	Страна A country	Вакансии Job openings	Декларируемая корпоративная/организационная культура (при наличии) Declared corporate/organizational culture (if any)	Гибкие навыки Soft skills
1	Bundesagentur für Arbeit ¹	Германия Germany	Менеджер по строительству. Управление проектами Construction manager. Project management	«Многообразие наших сотрудников и взаимное уважение — как между сотрудниками, так и на всех уровнях компании» ⁶ “The diversity of our employees and mutual respect — both between employees and at all levels of the company” ⁶	Высокий уровень обязательности, гибкости и стрессоустойчивости; предпринимательское мышление и действие, уверенность в себе и навыки командной работы; независимый и структурированный способ работы High level of commitment, flexibility and stress tolerance; entrepreneurial thinking and action, self-confidence and teamwork skills; independent and structured way of working
2			Инженер-проектировщик по строительным услугам Design engineer for construction services		
3	Make it in Germany ²	Германия Germany	Планировщик проектов Project Planner	«Опытная команда, где каждый может положиться друг на друга. Вот почему мы создаем рабочую среду, которая мотивирует сотрудников оставаться на работе» ⁷ “An experienced team where everyone can rely on each other. That’s why we create a work environment that motivates employees to stay at work” ⁷	Высокий уровень коммуникативных навыков и навыков командной работы, гибкость, прагматизм и убедительность, предпринимательское мышление, а также независимый, структурированный и внимательный подход к работе High level of communication and teamwork skills, flexibility, pragmatism and persuasiveness, entrepreneurial thinking, as well as an independent, structured and attentive approach to work
4			Менеджер по строительству Construction Manager	«Открытая и непосредственная корпоративная культура. Разнообразная работа в успешной и амбициозной компании» ⁷ “An open and direct corporate culture. Diverse work in a successful and ambitious company” ⁷	Навыки ведения переговоров, ориентированные на поиск решений, и приверженность делу. Коммуникативные навыки и способность работать в команде Solution-oriented negotiation skills and commitment Communication skills and ability to work in a team
5			Инженер проекта Project Engineer	«Ценим разнообразие и равные возможности» ⁷ “We value diversity and equal opportunities” ⁷	Обеспечение целенаправленной коммуникации со всеми подразделениями компании и на всех уровнях. Лидерские навыки и опыт руководства проектными группами. Целеустремленный и независимый стиль работы. Открытость и умение работать в команде. Высокие коммуникативные навыки и навыки убеждения Ensuring targeted communication with all departments of the company and at all levels. Leadership skills and experience in leading project teams. Purposeful and independent work style. Openness and teamwork skills. High communication and persuasion skills

⁶ Bundesagentur für Arbeit // Официальный сайт Федерального агентства занятости Германии. URL: <https://www.arbeitsagentur.de/>

⁷ Make it in Germany // Официальный сайт Биржи вакансий в Германии. URL: <https://www.make-it-in-germany.com/de/>

Продолжение табл. / Continue of the Table

Номер Number	Сайт Website	Страна A country	Вакансии Job openings	Декларируемая корпоративная/организационная культура (при наличии) Declared corporate/organizational culture (if any)	Гибкие навыки Soft skills
6			Менеджер проектов по развитию недвижимости Real Estate Development Project Manager	«Страсть от разработки концепции до ее окончательной реализации. Семейный коллектив с горизонтальной иерархией и благодарной корпоративной культурой» ⁷ “Passion from concept development to its final implementation. A family team with a horizontal hierarchy and a grateful corporate culture” ⁷	Сильная напористость, сильные коммуникативные навыки и высокая степень приверженности. Страсть к отличной работе в сочетании с командным духом, надежностью и чувством ответственности Strong assertiveness, strong communication skills and a high degree of commitment. Passion for excellent project work combined with team spirit, reliability and a sense of responsibility
7	Apłikuj.pl ⁸	Польша Poland	Менеджер по строительству Construction Manager	«Интересные проекты — нет места рутине! Комфорт и эффективность имеют значение» ⁸ “Interesting projects — there is no place for routine! Comfort and efficiency matter” ⁸	Умение работать в условиях дефицита времени и быстро решать проблемы. Работа в команде The ability to work under time constraints and solve problems quickly. Teamwork
8			Инженер-строитель Civil Engineer	«Динамичная команда, реализующая интересные и престижные проекты» ⁸ “A dynamic team implementing interesting and prestigious projects” ⁸	Навыки общения и работы в команде. Страсть и искренний интерес к отрасли. Навыки управления временем и способность работать в условиях дефицита времени Communication and teamwork skills. Passion and sincere interest in the industry. Time management skills and the ability to work under time constraints
9			Инженер-строитель Civil Engineer	«Дружный и сплоченный коллектив. Динамично развивающаяся компания. Забота о положительном имидже компании» ⁸ “A friendly and cohesive team. A dynamically developing company. Taking care of the company’s positive image” ⁸	Высокая личная культура. Умение организовывать рабочее время. Навыки общения High personal culture. The ability to organize working hours. Communication skills
10	reed.co.uk ⁹	Великобритания Great Britain	Старший архитектор Senior Architect	«Успешная компания» ⁹ “A successful company” ⁹	Опыт управления младшими членами команды; способность хорошо работать как самостоятельно, так и в команде; особое внимание к деталям; отличные коммуникативные и организационные навыки Experience in managing junior team members; ability to work well both independently and in a team; special attention to detail; excellent communication and organizational skills

⁸ Apłikuj.pl // Официальный сайт объявлений о работе в Польше. URL: <https://www.aplikuj.pl/>
⁹ Reed.co.uk // Официальный сайт по подбору персонала в Великобритании. URL: <https://www.reed.co.uk/>

Продолжение табл. / Continue of the Table

Номер Number	Сайт Website	Страна A country	Вакансии Job openings	Декларируемая корпоративная/организационная культура (при наличии) Declared corporate/organizational culture (if any)	Гибкие навыки Soft skills
11			Руководитель отдела безопасности и соответствия требованиям строительства Head of the Construction Safety and Compliance Department	«Ценится равенство, разнообразие и инклюзивность, приветствуются заявки от всех слоев общества и партнерских организаций» ⁹ «Equality, diversity, and inclusivity are valued, and applications from all walks of life and partner organizations are welcome» ⁹	Отличные коммуникативные и межличностные навыки, опыт эффективного взаимодействия с регулирующими органами и внешними аудиторами. Подтвержденные лидерские навыки Excellent communication and interpersonal skills, experience in effective interaction with regulatory authorities and external auditors. Proven leadership skills
12			Менеджер строительного проекта Construction Project Manager	«Хорошо зарекомендовавшая себя многопрофильная консалтинговая компания, работающая над громкими и сложными разработками» ⁹ «A well-established multidisciplinary consulting company working on high-profile and complex developments» ⁹	Отличные коммуникативные навыки и навыки работы с клиентами. Умение работать самостоятельно и в команде Excellent communication and customer service skills, Ability to work independently and in a team
13	Leboncoin ¹⁰	Франция France	Консультант по сделкам с недвижимостью Consultant on real estate transactions	«В основе бизнеса лежат люди и дух сотрудничества, и мы стремимся постоянно развиваться к лучшему. Убежденность в том, что успех каждого зависит от успеха всех. Решительная вера в людей и коллективный дух, позволяющий идти дальше и менять сферу недвижимости» ¹⁰ «The business is based on people and the spirit of cooperation, and we strive to constantly develop for the better. The belief that everyone's success depends on everyone's success. Strong faith in people and a collective spirit that allows us to move on and change the real estate industry» ¹⁰	Мобильность. Темперамент бизнес-лидера. Жизнерадостность, общительность. Внимание, отзывчивость. Способность вызывать доверие. Приоритет человеческим качествам и навыкам межличностного общения, которые имеют решающее значение Mobility. The temperament of a business leader. Cheerfulness, sociability. Attention, responsiveness. The ability to inspire trust. Prioritize human qualities and interpersonal skills, which are crucial
14			Руководитель участка Head of the site	Не указано Not specified	Строгость, организованность, любовь к работе в команде, владение реальными навыками адаптации и управления. Контроль, управление и руководство командой. Универсальность и динамизм Rigor, organization, love of teamwork, possession of real adaptation and management skills. Control, management and leadership of the team. Versatility and dynamism
15	Trovavolavoro ¹¹	Италия Italy	Менеджер по строительству Construction Manager	Не указано Not specified	Оперативное руководство, точность и автономность Operational leadership, accuracy and autonomy

¹⁰ Leboncoin // Официальный сайт объявлений во Франции. URL: <https://www.leboncoin.fr/>

¹¹ Trovavolavoro // Официальный сайт вакансий в Италии. URL: <https://trovavolavoro.com/>

Продолжение табл. / Continue of the Table

Номер Number	Сайт Website	Страна A country	Вакансии Job openings	Декларируемая корпоративная/организационная культура (при наличии) Declared corporate/organizational culture (if any)	Гибкие навыки Soft skills
16	Almalaura ¹²	Италия Italy	IT-специалист IT specialist	«В группе первых в мире» ¹² “In the group of the first in the world” ¹²	Умение сохранять спокойствие, способность к анализу и решению проблем, отношение к работе в команде и борьба со стрессом. Страсть к технологиям: искренний интерес к инновациям. The ability to remain calm, the ability to analyze and solve problems, the attitude to teamwork and stress management. Passion for technology: a sincere interest in innovation
17			Руководитель проекта Project manager	«В группе первых на европейском, ближневосточном и африканском рынках» ¹² “Among the first in the European, Middle Eastern and African markets” ¹²	Внутренняя ответственность. Умение работать в команде. Общительность, контактность, умение вести переговоры Internal responsibility. The ability to work in a team. Sociability, communication skills, ability to negotiate
18	Infojobs ¹³	Испания Spain	Менеджер по строительству здания Building Construction Manager	«Крупная, быстрорастущая строительная компания» ¹³ “A large, fast-growing construction company” ¹³	Умение адаптироваться к изменениям и развитию проектов, а также к различным культурам и стилям управления. Лидерские навыки и умение управлять рабочими коллективами. Отличные коммуникативные навыки и способность устанавливать эффективные отношения с клиентами, поставщиками и субподрядчиками. Ориентация на детали и способность эффективно решать проблемы The ability to adapt to changes and development of projects, as well as to different cultures and management styles. Leadership skills and the ability to manage work teams. Excellent communication skills and the ability to establish effective relationships with customers, suppliers and subcontractors. Focus on details and the ability to solve problems effectively
19			Специалист по детальному проектированию BIM BIM Detailed Design Specialist	«Солидная и платежеспособная компания с долгой историей постоянного развития. Страсть и энтузиазм — два качества, из которых состоит команда компании. Компания, нацеленная на создание лучшего будущего для тех из нас, кто будет в нем жить» ¹³ “A solid and solvent company with a long history of continuous development. Passion and enthusiasm are two qualities that make up the company’s team. A company aimed at creating a better future for those of us who will live in it” ¹³	Внимательность, внимание к деталям, нацеленность на результат, способность управлять несколькими проектами одновременно, умение работать в многопрофильной команде, владение особым видением Attentiveness, attention to detail, focus on results, the ability to manage multiple projects simultaneously, the ability to work in a multidisciplinary team, possession of a special vision

¹² Almalaura // Межвузовский консорциум в Италии. URL: <https://www.almalaura.it/>

¹³ Infojobs // Частная онлайн-доска вакансий на рынках Испании, Италии и Бразилии. URL: <https://www.infojobs.net/>

Продолжение табл. / Continue of the Table

Номер Number	Сайт Website	Страна A country	Вакансии Job openings	Декларируемая корпоративная культура (при наличии) Declared corporate/organizational culture (if any)	Гибкие навыки Soft skills
20			Менеджер по строительству Construction Manager	«Команда профессионалов превращает каждое пространство в уникальное место со своим характером и историей» ¹³ “A team of professionals transforms each space into a unique place with its own character and history.” ¹³	Навыки решения проблем, принятия решений и управления стрессовыми ситуациями Problem solving, decision-making, and stress management skills
21	Robert Half ¹⁴	США USA	Менеджер архитектурного проекта Architectural Project Manager	«Работа в компании — захватывающая возможность для человека, ориентированного на детали и увлеченного представлением инновационных и высококачественных архитектурных решений» ¹⁴ “Working for a company is an exciting opportunity for someone who is detail-oriented and passionate about delivering innovative and high-quality architectural solutions.” ¹⁴	Отличные коммуникативные и лидерские навыки для управления группами, взаимодействия с клиентами и заинтересованными сторонами. Умение сотрудничать Excellent communication and leadership skills for managing groups, interacting with clients and stakeholders. The ability to cooperate
22			Помощник по административным вопросам сам строительства Construction Administrative Assistant	Не указано Not specified	Инициативность. Сильные организационные и коммуникативные навыки. Умение работать в режиме многозадачности, эффективно расставлять приоритеты и работать в быстро меняющейся среде. Профессиональное поведение и ориентированное на обслуживание клиентов отношение Initiative. Strong organizational and communication skills. The ability to multitask, prioritize effectively, and work in a rapidly changing environment. Professional behavior and customer service-oriented attitude
23			Руководитель участка Head of the site	Не указано Not specified	Исключительные организационные и лидерские навыки для эффективного управления командами и субподрядчиками. Отличные коммуникативные способности и способность решать проблемы на месте Exceptional organizational and leadership skills for effective management of teams and subcontractors. Excellent communication skills and the ability to solve problems on the spot
24	Bumeran ¹⁵	Аргентина Argentina	Специалист по компьютерной поддержке Computer Support Specialist	Не указано Not specified	Отличные навыки общения и решения проблем. Умение работать самостоятельно и в команде Excellent communication and problem solving skills. Ability to work independently and in a team

¹⁴ Robert Half // Международная консалтинговая компания по кадрам. URL: <https://www.roberthalf.com/us/en>

¹⁵ Bumeran // Сайт для поиска работы в Аргентине, Чили, Перу и Эквадоре. URL: <https://www.bumeran.com.ar/>

Продолжение табл. / Continue of the Table

Номер Number	Сайт Website	Страна A country	Вакансии Job openings	Декларируемая корпоративная/организационная культура (при наличии) Declared corporate/organizational culture (if any)	Гибкие навыки Soft skills
25			Агент по недвижимости Real Estate Agent	«Превосходный рабочий климат и культура. Поддержка принадлежности к ведущему мировому бренду» ¹⁵ “Excellent working climate and culture. Support for belonging to a leading global brand” ¹⁵	Предприимчивость, коммерческая и активная позиция. Люди, которым нравится общаться и взаимодействовать с людьми. Способность к самоуправлению. Нацеленность на результат. Преданность делу и настойчивость Entrepreneurial, commercial and active position. People who like to communicate and interact with people. The ability to self-manage. Focus on results. Dedication and perseverance
26	ChinaJob ¹⁶	Китай China	Инженер-теплотехник Heat Engineering Engineer	«Высокотехнологичное предприятие» ¹⁶ “High-tech enterprise” ¹⁶	Наличие хороших коммуникативных навыков, командного духа и профессиональной этики. Общительный характер и сильная способность выдерживать давление Having good communication skills, team spirit and professional ethics; Sociable character and strong ability to withstand pressure
27			Менеджер проекта Project Manager	«Международная расширяющаяся компания, крупнейшая в Китае в своем секторе» ¹⁶ “An international expanding company, the largest in China in its sector” ¹⁶	Ответственность. Отличные коммуникативные навыки и навыки командной работы Responsibility. Excellent communication and teamwork skills
28	Foundit ¹⁷	Индия India	Инженер-менеджер проекта Engineer-Project Manager	Не указано Not specified	Умение устанавливать профессиональные отношения и коммуникации с клиентами, коллегами и руководством. Сильные навыки управления межличностным общением. Проверенная способность развивать инженерные команды для выполнения сложных этапов проекта The ability to establish professional relationships and communication with clients, colleagues and management. Strong interpersonal communication management skills. Proven ability to develop engineering teams to complete complex project phases
29	Careers in Africa ¹⁸	Ангола Angola	Инженер-строитель Civil Engineer	Не указано Not specified	Отличные лидерские навыки. Хорошие презентационные навыки. Самостоятельный, инициативный и реагирующий на потребности клиентов. Отличные коммуникативные навыки, способность эффективно общаться внутри организации и с внешними клиентами/заказчиками. Способность выстраивать прочные и эффективные рабочие отношения между различными потоками поставок Excellent leadership skills. Good presentation skills. Independent, proactive and responsive to customer needs. Excellent communication skills, the ability to communicate effectively within the organization and with external clients/customers. The ability to build strong and effective working relationships between different supply chains

¹⁶ ChinaJob // Сайт для поиска работы в Китае. URL: <https://www.chinajob.com/>¹⁷ Foundit // Приложение для поиска работы в Индии, на ближнем Востоке и Юго-Востоке. URL: <https://www.foundit.in/>¹⁸ Careers in Africa // Сайт для поиска работы в Африке. URL: <https://www.careersinafrica.com/>

Номер Num- ber	Сайт Website	Страна A country	Вакансии Job openings	Декларируемая корпоративная/организационная культура (при наличии) Declared corporate/organizational culture (if any)	Гибкие навыки Soft skills
30			Старший инженер-строитель Senior Civil Engineer	Не указано Not specified	Умение направлять и руководить инженерами и дизайнерами. Эффективные навыки письменного и устного общения. Хорошие навыки работы в команде. Проактивная позиция The ability to guide and lead engineers and designers. Effective written and oral communication skills. Good teamwork skills. Pro-active attitude
31	HeadHunter ¹⁹	Россия Russia	Инженер ПТО Engineer of the production and technical department	«Мы стремимся к лучшему будущему, создаем город комфортным для жизни» ¹⁹ “We strive for a better future, we create a city comfortable for living” ¹⁹	Дисциплинированный, организованный специалист, который также настроен развиваться вместе с нами. Умение находить общий язык с коллективом A disciplined, organized specialist who is also determined to develop with us. The ability to find a common language with the team
32	Работа.ру ²⁰ Rabota.ru ²⁰	Россия Russia	Главный инженер проекта Chief Engineer of the project	«Стабильная компания с интересными проектами» ²⁰ “A stable company with interesting projects” ²⁰	Высокие организаторские и управленческие навыки, способность к стратегическому планированию. Коммуникабельность, умение работать в команде High organizational and managerial skills, ability to strategic planning. Communication skills, ability to work in a team
33	SuperJob ²¹	Россия Russia	Ведущий архитектор-реставратор Leading architect and restorer	«Сплоченное сообщество высокопрофессиональных аттестованных специалистов в своей области, разных профессий и поколений, объединенных общей задачей, общим делом...» ²¹ “A close-knit community of highly professional, certified specialists in their field, of different professions and generations, united by a common task, a common cause...” ²¹	Навыки соблюдения сроков, слаженной работы в команде, умение грамотно поставить задачу и контролировать ее и исполнение The skills of meeting deadlines, teamwork, the ability to correctly set a task and monitor its execution

¹⁹ HeadHunter. Работа в Москве, поиск персонала и публикация вакансий // Сайт по поиску работы и сотрудников. URL: <https://hh.ru/?hhmtFrom=vacancy>

²⁰ Работа.ру // Сервис услуг по подбору персонала и поиску работы. URL: <https://www.rabota.ru/>

²¹ SuperJob // IT-сервис по поиску работы и подбору сотрудников. URL: <https://www.superjob.ru/>

Франция, а также жизнерадостность и приоритет человеческим качествам и навыкам межличностного общения, которые имеют решающее значение. Компания декларирует ценности через людей, дух сотрудничества, стремление постоянно развиваться к лучшему, убежденность в том, что успех каждого зависит от успеха всех, решительную веру в людей и коллективный дух, позволяющий идти дальше и менять сферу недвижимости. Также в части идентификации, измерения, определения критериев развития гибких навыков интерес вызывает позиция 18 «Специалист по детальному проектированию BIM», Испания, и ожидаемое от будущего специалиста качество «владение особым видением».

В целом результаты сопоставимы с прежними исследованиями. Зарубежные работодатели более эмоциональны в презентации компании и требованиях к соискателям, в содержании которых отражены тенденции, при их помощи предприняты попытки описать мир и его будущее. Результаты показали, что поликультурные аспекты не утратили своей значимости. Субкультуры в строительной отрасли представлены ярко, что наделяет организации многообразием по этому признаку. Налаженные межкультурные коммуникации упрощают процесс решения профессиональных задач, а обучающим инструментом в первую очередь служит деловое общение на основе сформированной корпоративной/организационной культуры. Разные языки у представителей различных национальных культур являются не просто языковым барьером в чистом виде, это часто гигантская разница в менталитете, мировоззрении, способах мышления. Совместная трудовая деятельность, движимая общими целями, способна сгладить обострения, но на это требуется время, которого в неисчерпаемом количестве организации предоставить не могут. Субкультуры «начальник – подчиненный», а также профессиональные и возрастные субкультуры во всем мире воспринимаются как носители разного языка, ценностей, стереотипных моделей поведения. На оптимизацию взаимодействия направлены корпоративные мероприятия, а также формирование соответствующей внутренней среды функционирования организации [2, 12, 46]. Также, сравнивая данное исследование с предыдущими, стоит отметить разницу, связанную с внедрением цифровых технологий в сферу управления персоналом. С одной стороны, процесс взаимодействия с соискателями на вакантную должность упрощается за счет применения искусственного интеллекта, с другой стороны утрачивается межличностный контакт между соискателем и принимающим на работу сотрудником подразделений по управлению персоналом [2]. Направленность на человека работодатели указывают, но является ли эта формальность угодным времени лозунгом или это действительно часть культуры компаний требует дальнейшего выяснения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, к мировым тенденциям, определяющим вектор развития компаний и их подразделений, относятся: глобальная интеграция/деинтеграция экономик и обществ, урбанизация, волны массовой миграции, поликультурность и субкультурная неоднородность, демографический фактор в целом, цифровизация и информатизация, изменение характера конфликтов на всех уровнях. К отраслевым тенденциям относятся экономические ограничения (санкции) и их последствия, изменение конъюнктуры рынка, мобильные производственные площадки, поликультурность состава, геополитические факторы, проблема соответствия системы управления персоналом текущим и будущим вызовам. Обобщенно представленные индивидуальные качества сотрудников в таких условиях предполагают наличие коммуникативных способностей; адаптивность; социальную чуткость; психическую гибкость, пластичность; умение адекватно действовать в конфликтных ситуациях; способность управлять своим психоэмоциональным состоянием.

Среди персональных качеств, затребованных работодателями по всему миру, а значит способных влиять на повышение эффективности организаций и отрасли в целом, выделяются коммуникативные навыки, умение работать в команде, лидерские качества, вовлеченность (приверженность), направленность на людей.

Особенности управления персоналом в строительных организациях на современном этапе и в будущем заключаются в подготовке ориентированных на человека способах взаимодействия на этапах поиска, подбора, найма персонала, а также в процессе адаптации нового сотрудника, его продвижения и развития. При этом применение информационных технологий привносится с целью сокращения затрат и ускорения процессов управления персоналом, но не вместо непосредственного контакта представителя организации и будущего или действующего сотрудника. Поликультурный аспект управления персоналом, а также быстрая смена условий функционирования отрасли, организации, проектная форма работы в командах со временем не утрачивают своей актуальности, но становятся иными под влиянием геополитических факторов. Вектор усилий представителей подразделений по управлению персоналом также удерживается на оптимизации взаимодействия между представителями различных субкультур.

Результаты исследования могут быть использованы как строительными организациями (независимо от стадии их развития) при совершенствовании кадровой политики и формировании корпоративной культуры, так и начинающими специалистами отрасли для выстраивания осознанной траектории профессионального и личностного роста. В дальнейшем сбор, анализ и систематизация данных будут продолжены. Требования работодателей от-

слеживаются. Интерес представляют выводы по отдельно взятым географическим регионам в связи со сменой партнерства на государственном уровне; по должностям и профессиям строительной отрасли.

Также проводится исследование среди студентов в строительных образовательных организациях с целью выявления уровня сформированности гибких навыков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Nahavandi S.* Industry 5.0—A Human-Centric Solution // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Issue 16. P. 4371. DOI: 10.3390/su11164371. EDN DIUQCT.
2. *Verstina N.G., Magera T.N.* Improving the quality of work of construction project teams taking into account socio-psychological aspects // *International Journal for Quality Research*. 2024. Vol. 18. Issue 3. Pp. 841–866. DOI: 10.24874/IJQR18.03-15. EDN MKZTVS.
3. *Magera T.* Smart Educational Technologies in Training Construction Teams: Responsibility and Sustainable Development Goals // *Lecture Notes in Information Systems and Organisation*. 2022. Pp. 235–243. DOI: 10.1007/978-3-031-05175-3_24
4. *Шваб К.* Четвертая промышленная революция. М. : Эксмо, 2016. 285 с.
5. *Шу Г., Андерл Р., Гауземайер Ю., тен Хомпель М., Вальстер В. и др.* Индекс зрелости Индустрии 4.0: управление цифровым преобразованием компаний. Munich : Herbert Utz Verlag, 2017.
6. *Магера Т.Н.* Индустрия 4.0 и развитие компании // *Экономика и предпринимательство*. 2018. № 10 (99). С. 943–946. EDN YAETMD.
7. *Магера Т.Н.* Технологии Четвертой промышленной революции: ориентиры для бизнеса // *Экономика и предпринимательство*. 2018. № 10 (99). С. 165–168. EDN YAERPN.
8. *Шваб К.* Технологии Четвертой промышленной революции. М. : Бомбора, 2018. 317 с.
9. *Марзаганов Р.Х.М., Гордеев Т.М., Корнилов М.М.* Особенности развития стройиндустрии в современных условиях // *Строительные материалы*. 2025. № 3. С. 11–16. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-833-3-11-16. EDN AOEKSH.
10. *Parsons Talcott.* The Structure of Social Action. New York and London : McGraw-Hill Book Company, 1937. 817 p.
11. *Хэнди Ч.* Время безрассудства. Искусство управления в организации будущего. СПб. : Питер, 2001. 288 с.
12. *Магера Т.Н.* Ролевой состав и организационная культура современных строительных команд // *Человеческий капитал*. 2022. № 12–1 (168). С. 168–177. DOI: 10.25629/HC.2022.12.20. EDN ERUSXG.
13. *Камерон К., Куинн Р.* Диагностика и изменение организационной культуры. СПб. : Питер, 2001. 320 с.
14. *Магера Т.Н., Кристаль М.О.* Современные тенденции, проблемы и возможности управления персоналом строительной компании // *Экономика и предпринимательство*. 2018. № 4 (93). С. 1044–1047. EDN YXKSDW.
15. *Магера Т.Н.* Основы стратегической работы с персоналом современной организации строительной отрасли и их характеристики // *Экономика и предпринимательство*. 2019. № 4 (105). С. 851–854. EDN SFFQAF.
16. *Леонова О.И., Леонов А.В.* Система управления персоналом в период реорганизации // *Современные технологии управления*. 2014. № 1 (37). С. 23–29. EDN RTZRPV.
17. *Алоев Т.Б., Гурфова Р.В., Сохова С.Х., Шадзова И.А.* Оптимизация бизнес-процессов и управления персоналом как основа эффективности функционирования организации // *Гуманитарные, социально-экономические и общественные науки*. 2016. № 3. С. 123–126. EDN VRCNXN.
18. *Ансофф И.* Стратегический менеджмент. Классическое издание. М. : Питер, 2009. 343 с. EDN TLZZWR.
19. *Артамонов Б.В.* Стратегический менеджмент. М. : ФГОУ ВПО МГТУ ГА, 2004. 91 с.
20. *Архипов В.М.* Стратегическое управление. СПб. : СПбГУЭФ, 2000. 245 с.
21. *Базаров Т.Ю.* Психология управления персоналом : учебник и практикум для академического бакалавриата. М. : Издательство Юрайт, 2014. 381 с.
22. *Виханский О.С.* Стратегическое управление : учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Гардарики, 2003. 292 с.
23. *Литвак Б.Г.* Стратегический менеджмент : учебник. М. : Издательство Юрайт, 2013. 507 с.
24. *Одегов Ю.Г., Карташова Л.В.* Управление персоналом: оценка эффективности : учебное пособие. М. : Экзамен, 2004. 256 с.
25. *Социальная психология труда: Теория и практика : монография.* Т. 2 / отв. ред. А.Л. Журавлев, Л.Г. Дикая. М. : Изд-во «Институт психологии РАН», 2010. С. 115–130.
26. *Андреева И.В., Кошелева С.В., Спивак В.А.* Управление персоналом. СПб. : Нева, Олма-Пресс, 2003. 224 с.
27. *Mohammad Al.M., Menhat M., Shafi S., Mohammed Abu Hussein Al.H., Abdullah Al-Mubaideen M., Alshaketheep Kh.* Trends in employee performance: A comprehensive review and bibliometric analysis using Scopus and WOS // *SA Journal of Human Resource Management*. 2025. Vol. 23.

Issue 0. DOI: 10.4102/sajhrm.v23i0.2887. EDN WSLNSU.

28. *Alam I., Kartar Singh J.S., Islam M.U.* Does supportive supervisor complements the effect of ethical leadership on employee engagement? // *Cogent Business and Management*. 2021. Vol. 8. Issue 1. P. 1978371. DOI: 10.1080/23311975.2021.1978371. EDN DKQCVY.

29. *Хоманс Дж.* Социальное поведение как обмен // *Современная зарубежная социальная психология*. М., 1984. С. 82–91.

30. *Abdullahi M.S., Raman K., Solarin S.A.* Talent management practices on employee performance among academic staff of Malaysian private universities: Employee engagement as a mediator // *Journal of Applied Research in Higher Education*. 2022. Vol. 14. Issue 1. Pp. 135–158. DOI: 10.1108/JARHE-08-2020-0283. EDN DHEFIP.

31. *Sugianingrat I.A.P.W., Widyawati S.R., de Jesus da Costa C.A., Ximenes M., Piedade S.D.R., Sartmawa W.G.* The employee engagement and OCB as mediating on employee performance // *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2019. Vol. 68. Issue 2. Pp. 319–339. DOI: 10.1108/IJPPM-03-2018-0124

32. *Widarko A., Anwarodin M.K.* Work motivation and organizational culture on work performance: Organizational citizenship behavior (OCB) as mediating variable // *Golden Ratio of Human Resource Management*. 2022. Vol. 2. Issue 2. Pp. 123–138. DOI: 10.52970/grhrm.v2i2.207. EDN LJYFTC.

33. *Awan S.H., Habib N., Shoaib Akhtar Ch., Naveed Sh.* Effectiveness of performance management system for employee performance through engagement // *SAGE Open*. 2020. Vol. 10. Issue 4. DOI: 10.1177/2158244020969383. EDN UHFEDR.

34. *Gemeda H.K., Lee J.* Leadership styles, work engagement and outcomes among information and communications technology professionals: A cross-national study // *Heliyon*. 2020. Vol. 6. Issue 4. P. e03699. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03699. EDN MKJWKC.

35. *Kaya B., Karatepe O.M.* Does servant leadership better explain work engagement, career satisfaction and adaptive performance than authentic leadership? // *International Journal of Contemporary Hospitality Management*. 2020. Vol. 32. Issue 6. Pp. 2075–2095. DOI: 10.1108/IJCHM-05-2019-0438. EDN JDVTJF.

36. *Masa'deh R., Obeidat B.Y., Tarhini A.* A Jordanian empirical study of the associations among transformational leadership, transactional leadership, knowledge sharing, job performance, and firm performance // *Journal of Management Development*. 2016. Vol. 35. Issue 5. Pp. 681–705. DOI: 10.1108/JMD-09-2015-0134

37. *Sarwar H., Ishaq M.I., Amin A., Ahmed R.* Ethical leadership, work engagement, employees' well-being, and performance: A cross-cultural comparison // *Journal of Sustainable Tourism*. 2020. Vol. 28. Issue 12. Pp. 2008–2026. DOI: 10.1080/09669582.2020.1788039. EDN RVDVGD.

38. *Zhang X., Qing L., Wang S., Chun D.* The effect of Human Resource Director (HRD) competency on the performance of exponential organizations — Analysis of the continuous mediating effect based on organizational identity, self-efficacy, and the moderating effect of organizational politics // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Issue 2. P. 936. DOI: 10.3390/su15020936. EDN JMFOJG.

39. *Kim J., Jung H.-S.* The effect of employee competency and organizational culture on employees' perceived stress for better workplace // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19. Issue 8. DOI: 10.3390/ijerph19084428. EDN KBRGFJ.

40. *Lai F.Yi., Tang H.Ch., Lu S.Ch., Lee Yu.Ch., Lin Ch.Ch.* Transformational leadership and job performance: The mediating role of work engagement // *SAGE Open*. 2020. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.1177/2158244019899085. EDN GWLRWK.

41. *Bass B.M., Riggio R.E.* Transformational Leadership (2nd ed.). Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 2006. 296 p.

42. *Хижная А.В., Быстрова Н.В., Шарыгина Е.Н.* Развитие soft skills («гибких навыков») для успешной карьеры выпускников вуза // *Проблемы современного педагогического образования*. 2019. № 65–2. С. 261–264. EDN MUXTLC.

43. *Сорокопуд Ю.В., Амчиславская Е.Ю., Ярославцева А.В.* Soft Skills («мягкие навыки») и их роль в подготовке современных специалистов // *Мир науки, культуры, образования*. 2021. № 1 (86). С. 194–196. DOI: 10.24412/1991-5497-2021-186-194-196. EDN RTNNIM.

44. *Saunders L., Bajjaly S.* Direct instruction of inter- and intrapersonal skills for business education // *Journal of Education for Business*. 2022. Vol. 97. Issue 8. Pp. 513–520. DOI: 10.1080/08832323.2021.1997884. EDN TOMBAY.

45. *Лукашенко М.А., Алексеева Е.В.* Гибкие навыки: рейтинг в оценке предпринимателей и участие вузов в их формировании // *Высшее образование в России*. 2024. Т. 33. № 3. С. 126–140. DOI: 10.31992/0869-3617-2024-33-3-126-140. EDN FXGXRC.

46. *Magera T.N.* Emotional Component in a Multicultural Construction Organization // *Modern Journal of Language Teaching Methods*. 2018. Vol. 8. Issue 11. Pp. 662–670.

Поступила в редакцию 11 марта 2026 г.

Принята в доработанном виде 15 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 13 апреля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Татьяна Николаевна Магера** — кандидат психологических наук, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 655991, Scopus: 56826173300, ResearcherID: AAD-6445-2019, ORCID: 0000-0002-2314-2971; mageratiana@mail.ru;

Сяохань Цюй — доцент кафедры геодезии и картографирования, заместитель директора отдела по академическим вопросам; **Шеньянский технологический институт**; 113122, провинция Ляонин, г. Фушунь, восточный участок дороги Биньхэ № 1, демонстрационная зона Шенфу, Китайская Народная Республика; 519851867@qq.com.

Вклад авторов:

Магера Т.Н. — идея использовать реальные требования работодателей по всему миру для формирования практико-обоснованного представления о востребованных гибких навыках в строительных организациях, а также сбор и систематизация данных, подбор теоретического материала, написание статьи.

Сяохань Цюй — предоставление информации по опыту международного сотрудничества в академической и строительной среде, участие в сборе данных, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Nahavandi S. Industry 5.0—A Human-Centric Solution. *Sustainability*. 2019; 11(16):4371. DOI: 10.3390/su11164371. EDN DIUQCT.
2. Verstina N.G., Magera T.N. Improving the quality of work of construction project teams taking into account socio-psychological aspects. *International Journal for Quality Research*. 2024; 18(3):841-866. DOI: 10.24874/IJQR18.03-15. EDN MKZTVS.
3. Magera T. Smart Educational Technologies in Training Construction Teams: Responsibility and Sustainable Development Goals. *Lecture Notes in Information Systems and Organisation*. 2022; 235-243. DOI: 10.1007/978-3-031-05175-3_24
4. Schwab C. *The fourth industrial revolution*. Moscow, Eksmo, 2016; 229. (rus.).
5. Shu G., Anderl R., Gausemeier Y., ten Hompel M., Walster V. et al. *Industry 4.0 Maturity Index: Managing digital transformation of companies*. Munich, Herbert Utz Verlag, 2017. (rus.).
6. Magera T.N. Industry 4.0 and company development. *Economics and Entrepreneurship*. 2018; 10(99):943-946. EDN YAETMD. (rus.).
7. Magera T.N. Technologies of the fourth industrial revolution: benchmarks for business. *Economics and Entrepreneurship*. 2018; 10(99):165-168. EDN YAERPN. (rus.).
8. Schwab C. *Shaping the fourth industrial revolution*. Moscow, Bombora, 2018; 317. (rus.).
9. Marzaganov R.H.M., Gordeev T.M., Kornilov M.M. The construction industry features development in modern conditions. *Construction Materials*. 2025; 3: 11-16. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-833-3-11-16. EDN AOEKSH. (rus.).
10. Parsons Talcott. *The Structure of Social Action*. New York and London, McGraw-Hill Book Company, 1937; 817.
11. Handy Ch. *A time of recklessness. The art of management in the organization of the future*. St. Petersburg, Peter, 2001; 288. (rus.).
12. Magera T.N. Role composition and organizational culture of modern construction teams. *Human Capital*. 2022; 12-1(168):168-177. DOI: 10.25629/HC.2022.12.20. EDN ERUSXG. (rus.).
13. Cameron K., Quinn R. *Diagnostics and change of organizational culture*. St. Petersburg, Peter, 2001; 320. (rus.).
14. Magera T.N., Kristal' M.O. Modern trends, problems and possibilities of personnel management of a construction company. *Economics and Entrepreneurship*. 2018; 4(93):1044-1047. EDN YXKSDW. (rus.).
15. Magera T.N. Fundamentals of strategic work with the staff of the modern organization of the construction industry and their characteristics. *Economics and Entrepreneurship*. 2019; 4(105):851-854. EDN SFFQAF. (rus.).
16. Leonova O.I., Leonov A.V. Personnel management system during restructuring (the case of retail company). *Modern Management Technology*. 2014; 1(37):23-29. EDN RTZRPV. (rus.).
17. Aloe V.T.B., Gurfova R.V., Sokhova S.Kh., Shadzova I.A. Optimization of business processes and personnel management as the basis for the effective functioning of an organization. *Humanities, Socio-Economic and Social Sciences*. 2016; 3:123-126. EDN VRCNXN. (rus.).
18. Ansoff I. *Strategic management. Classical edition*. Moscow, Peter, 2009; 343. EDN TLZZWR. (rus.).
19. Artamonov B.V. *Strategic management*. Moscow, FGOU VPO MSTU GA, 2004; 91. (rus.).
20. Arkhipov V.M. *Strategic management*. St. Petersburg, SPbGUEF, 2000; 245. (rus.).
21. Bazarov T.Y. *Psychology of personnel management : textbook*. Moscow, Yurait Publishing House, 2014; 381. (rus.).
22. Vikhansky O.S. *Strategic management : textbook. 2nd ed., revised and additional*. Moscow, Gardariki, 2003; 292. (rus.).

23. Litvak B.G. *Strategic management : textbook*. Moscow, Yurait Publishing House, 2013; 507. (rus.).
24. Odegov Yu.G., Kartashova L.V. *Personnel management, efficiency assessment : textbook*. Moscow, Exam, 2004; 256. (rus.).
25. *Social psychology of labor: Theory and practice : monograph. Vol. 2.* / Ed. by A.L. Zhuravlev, L.G. Dikaya. Moscow, Publishing House "Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences", 2010; 115-130. (rus.).
26. Andreeva I.V., Kosheleva S.V., Spivak V.A. *Personnel management*. St. Petersburg, Neva, Olma-Press, 2003; 224. (rus.).
27. Mohammad Al.M., Menhat M., Shafi S., Mohammed Abu Hussein Al.H., Abdullah Al-Mubaiden M., Alshaketheep Kh. Trends in employee performance: A comprehensive review and bibliometric analysis using Scopus and WOS. *SA Journal of Human Resource Management*. 2025; 23(0). DOI: 10.4102/sajhrm.v23i0.2887. EDN WLSNSU.
28. Alam I., Kartar Singh J.S., Islam M.U. Does supportive supervisor complements the effect of ethical leadership on employee engagement? *Cogent Business and Management*. 2021; 8(1):1978371. DOI: 10.1080/23311975.2021.1978371. EDN DKQCVY.
29. Homans J. Social behavior as an exchange. *Modern foreign social psychology*. Moscow, 1984; 82-91. (rus.).
30. Abdullahi M.S., Raman K., Solarin S.A. Talent management practices on employee performance among academic staff of Malaysian private universities: Employee engagement as a mediator. *Journal of Applied Research in Higher Education*. 2022; 14(1):135-158. DOI: 10.1108/JARHE-08-2020-0283. EDN DHEFIP.
31. Sugianingrat I.A.P.W., Widyawati S.R., de Jesus da Costa C.A., Ximenes M., Piedade S.D.R., Sarmawa W.G. The employee engagement and OCB as mediating on employee performance. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2019; 68(2):319-339. DOI: 10.1108/IJPPM-03-2018-0124
32. Widarko A., Anwarodin M.K. Work motivation and organizational culture on work performance: Organizational citizenship behavior (OCB) as mediating variable. *Golden Ratio of Human Resource Management*. 2022; 2(2):123-138. DOI: 10.52970/grhrm.v2i2.207. EDN LJYFTC.
33. Awan S.H., Habib N., Shoaib Akhtar Ch., Naveed Sh. Effectiveness of performance management system for employee performance through engagement. *SAGE Open*. 2020; 10(4). DOI: 10.1177/2158244020969383. EDN UHFEDR.
34. Gameda H.K., Lee J. Leadership styles, work engagement and outcomes among information and communications technology professionals: A cross-national study. *Heliyon*. 2020; 6(4):e03699. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03699. EDN MKJWKC.
35. Kaya B., Karatepe O.M. Does servant leadership better explain work engagement, career satisfaction and adaptive performance than authentic leadership? *International Journal of Contemporary Hospitality Management*. 2020; 32(6):2075-2095. DOI: 10.1108/IJCHM-05-2019-0438. EDN JDVTJF.
36. Masa'deh R., Obeidat B.Y., Tarhini A. A Jordanian empirical study of the associations among transformational leadership, transactional leadership, knowledge sharing, job performance, and firm performance. *Journal of Management Development*. 2016; 35(5):681-705. DOI: 10.1108/JMD-09-2015-0134
37. Sarwar H., Ishaq M.I., Amin A., Ahmed R. Ethical leadership, work engagement, employees' well-being, and performance: A cross-cultural comparison. *Journal of Sustainable Tourism*. 2020; 28(12):2008-2026. DOI: 10.1080/09669582.2020.1788039. EDN RVDVGD.
38. Zhang X., Qing L., Wang S., Chun D. The effect of Human Resource Director (HRD) competency on the performance of exponential organizations — Analysis of the continuous mediating effect based on organizational identity, self-efficacy, and the moderating effect of organizational politics. *Sustainability*. 2023; 15(2):936. DOI: 10.3390/su15020936. EDN JMFOJG.
39. Kim J., Jung H.-S. The effect of employee competency and organizational culture on employees' perceived stress for better workplace. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022; 19(8). DOI: 10.3390/ijerph19084428. EDN KBRGFJ.
40. Lai F.Yi., Tang H.Ch., Lu S.Ch., Lee Yu.Ch., Lin Ch.Ch. Transformational leadership and job performance: The mediating role of work engagement. *SAGE Open*. 2020; 10(1). DOI: 10.1177/2158244019899085. EDN GWLRWK.
41. Bass B.M., Riggio R.E. *Transformational Leadership (2nd ed.)*. Mahwah, NJ, Lawrence Erlbaum Associates, 2006; 296.
42. Hizhnaya A.V., Bystrova N.V., Sharygina E.N. Development of soft skills ("flexible skills") for a successful career of university graduates. *Problems of Modern Pedagogical Education*. 2019; 65-2:261-264. EDN MUXTLC. (rus.).
43. Sorokopud Yu.V., Amchislavskaya E.Yu., Yaroslavtseva O.V. Soft skills and their role in training modern. *World of Science, Culture and Education*. 2021; 1(86): 194-196. DOI: 10.24412/1991-5497-2021-186-194-196. EDN RTNNIM. (rus.).
44. Saunders L., Bajjaly S. Direct instruction of inter- and intrapersonal skills for business education. *Journal of Education for Business*. 2022; 97(8):513-520. DOI: 10.1080/08832323.2021.1997884. EDN TOMBAY.
45. Lukashenko M.A., Alekseeva E.V. Soft skills: rankings in the assessment of entrepreneurs and the participation of heis in their formation. *Higher Education in Russia*. 2024; 33(3):126-140. DOI: 10.31992/0869-3617-2024-33-3-126-140. EDN FXGXRC. (rus.).
46. Magera T.N. Emotional Component in a Multicultural Construction Organization. *Modern Journal of Language Teaching Methods*. 2018; 8(11):662-670.

Received March 11, 2026.

Adopted in revised form on March 15, 2026.

Approved for publication on April 13, 2026.

BIODOTES: Tatiana N. Magera — Candidate of Psychological Sciences, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 655991, Scopus: 56826173300, ResearcherID: AAD-6445-2019, ORCID: 0000-0002-2314-2971; mageratiana@mail.ru;

Xiaohan Qu — Associate Professor in Surveying and Mapping Science, Deputy Director of the Academic Affairs Office; **Shenyang Institute of Technology**; No. 1 Binhe Road East Section, Shenyang Demonstration Zone, Fushun, 113122, Liaoning Province, People's Republic of China; 519851867@qq.com.

Contribution of the authors:

Tatiana N. Magera — the author's personal contribution lies in the idea of using the real requirements of employers around the world to form a practice-based understanding of the soft skills in demand in construction organizations, as well as in collecting and systematizing data, selecting theoretical material, and writing an article.

Xiaohan Qu — the author's personal contribution is to provide data for the article on the experience of international co-operation in the academic and construction environment, as well as participation in data collection, writing the article.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.059:620.193

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.821-832

Контроль производительности труда на строительной площадке с помощью алгоритмов машинного обучения

Светлана Евгеньевна Манжилевская

Донской государственный технический университет (ДГТУ); г. Ростов-на-Дону, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Современная строительная индустрия активно использует сквозные технологии для оценки производительности труда рабочих-строителей, снижая показатели брака готовой продукции. Инновационные подходы повышают эффективность контроля действий рабочих. Применение технологий компьютерного зрения, видеоаналитики и алгоритмов машинного обучения может повысить объективность оценки производительности труда на строительных площадках.

Материалы и методы. Разработанная автоматизированная система анализа действий рабочих для контроля производительности труда на строительных объектах включает модуль распознавания действий и поз строителей, блок классификации действий и компонент для выделения ключевых точек. Платформа MediaPipe с моделью BlazePose идентифицирует 33 анатомические точки на теле для оценки позы строителя. Система компьютерного зрения обеспечивает непрерывный мониторинг и точное распознавание движений. Технология обеспечивает непрерывное распознавание рабочего даже при временной потере визуального контакта, создается база данных с характеристиками работников для аналитических целей. Применение автоматизированной системы исключает необходимость учитывать временной фактор при анализе сведений, что повышает эффективность процесса и позволяет сосредоточиться на элементах сцены. Разбивая запись на логические отрезки, исследуется каждый элемент рабочего процесса. Рекуррентные нейросети LSTM оптимизируют анализ действий рабочих.

Результаты. Оценка эффективности автоматизированной системы произведена на тестовом видео реализации строительного процесса каменной кладки для определения точности и способности к обобщению. Точность идентификации действий строителя достигла 80,1%. В течение 46,5 с при общем хронометраже видео 58 с модель правильно распознает действия.

Выводы. Результаты проведенной работы доказывают эффективность передовой системы мониторинга производительности труда в строительстве на основе технологий визуального распознавания. Система проводит комплексный мониторинг рабочих операций, оборудования и внешних условий на объекте. Алгоритмы и информационная база обеспечивают надежные измерения и возможности внедрения методики в строительное производство.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: производительность труда в строительстве, строительные работы, алгоритмы машинного обучения, искусственный интеллект, каменная кладка, нейронные сети, строительное производство

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Манжилевская С.Е. Контроль производительности труда на строительной площадке с помощью алгоритмов машинного обучения // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 821–832. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.821-832

Автор, ответственный за переписку: Светлана Евгеньевна Манжилевская, smanzhilevskaya@yandex.ru.

Monitoring labour productivity on a construction site using machine learning algorithms

Svetlana E. Manzhilevskaya

Don State Technical University (DSTU); Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The modern construction industry actively uses end-to-end technologies to assess the productivity of construction workers, reducing the number of defective products. Innovative approaches increase the effectiveness of monitoring workers' actions on construction sites. The use of modern computer vision technologies, video analytics, and machine learning algorithms can improve the objectivity of assessing productivity on construction sites.

Materials and methods. The developed automated system for analyzing workers' actions to control labour productivity at construction sites includes a module for recognizing workers' actions and poses, an action classification unit, and a component for highlighting key points. The MediaPipe platform with the BlazePose model identifies 33 anatomical points on the body to assess the worker's posture. The computer vision system provides continuous monitoring and accurate recognition of movements. The technology ensures continuous recognition of the worker, even when there is a temporary loss of visual contact, and creates a database with worker characteristics for analytical purposes. The use of an automated system eliminates the need to consider the time factor when analyzing data, which increases the efficiency of the process and allows you to focus on the elements of the scene. By dividing the recording into logical segments, each element of the workflow is examined. LSTM recurrent neural networks optimize the analysis of workers' actions.

Results. The effectiveness of the automated system was evaluated using a test video of the masonry construction process to determine its accuracy and generalization capabilities. The accuracy of identifying the builder's actions reached 80.1%. During a total of 46.5 seconds out of the 58-second video, the model correctly recognized the builder's actions.

Conclusions. The results of the work carried out prove the effectiveness of an advanced system for monitoring labour productivity in construction based on visual recognition technologies. The system provides comprehensive monitoring of work operations, equipment, and external conditions at the facility. The algorithms and information base ensure reliable measurements and the possibility of implementing the methodology in construction production.

KEYWORDS: labour productivity in construction, construction work, machine learning algorithms, artificial intelligence, masonry, neural networks, construction production

FOR CITATION: Manzhilevskaya S.E. Monitoring labour productivity on a construction site using machine learning algorithms. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):821-832. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.821-832 (rus.).

Corresponding author: Svetlana E. Manzhilevskaya, smanzhilevskaya@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современная строительная индустрия активно использует цифровые технологии для оценки производительности труда рабочих-строителей, что значительно снижает показатели брака готовой строительной продукции в сравнении с традиционными методами, основанными на ручном сборе данных и выборочной проверке [1]. Эти инновационные подходы призваны увеличить эффективность контроля отслеживания действий рабочих-строителей на строительном производстве [2, 3].

На начальных этапах распространение цифровых технологий на строительных площадках в основном осуществлялось с помощью сквозных технологий [4, 5]. С развитием интернета вещей началось более глубокое внедрение на строительные объекты электронных датчиков и оборудования, собирающих информацию на мобильные устройства, например беспилотные авиационные системы (БАС) и GPS [6, 7].

С целью эффективного управления строительными процессами необходимо использовать современные методы автоматизации для оценки производительности труда и качества реализуемой продукции [8]. Автоматизированный анализ и мониторинг в реальном времени позволят оперативно выявлять и решать потенциальные проблемы на объектах строительства, обнаруживая изменения в работе и поведении рабочих. Традиционные подходы к контролю качества строительной продукции зачастую не обеспечивают точных результатов из-за отсутствия систематического подхода и недостатка автоматизации в сборе и анализе сведений [9]. Это может привести к расхождениям между запланированными и фактическими показателями выработки, затрудняя объективную оценку производительности труда [10].

Технологии компьютерного зрения открывают перед строительной отраслью новые перспективы в автоматизации оценки производительности труда на площадках [11]. Применение передовых видеоаналитических алгоритмов и методов машинного обучения дает возможность точно определять деятельность рабочих на видеозаписях с места произ-

водства работ, обеспечивая более надежную и объективную оценку работы строителя [12]. В отличие от традиционных методов наблюдения, которые ограничены мониторингом отдельных работников и часто дают искаженные результаты, новые цифровые технологии позволяют более полно оценить производительность труда и выявить потенциальные улучшения в работе.

В сфере строительного производства ключевую роль в контроле за реализацией строительного процесса рабочих может играть идентификация и анализ различных действий, поз и взаимодействий среди рабочих и объектов на площадке, что помогает установить характер выполняемых работ [13]. Для этого можно применять специализированные алгоритмы, каждый из которых обладает уникальными свойствами и подходит для определенных задач. К примеру, алгоритм глубокого обучения CNN (Convolutional Neural Networks) используется для выявления и классификации объектов на изображениях, что помогает распознавать рабочих и технику [14]. Алгоритм YOLO (You Only Look Once) отличается быстротой и точностью в определении инструментов и материалов на строительной площадке [15]. В то время как алгоритм LSTM (Long Short-Term Memory), использующий анализ данных временных рядов, может быть эффективен для классификации действий рабочих, учитывая динамику и временные изменения в их движениях [16].

Для объединения различных алгоритмов и инструментов с целью создания эффективных решений в области распознавания действий применяются комплексные платформы — программные фреймворки. Пример такого фреймворка — MediaPipe (версия 0.8.7), разработанный специально для задач, связанных с компьютерным зрением. В его состав входят передовые модели и алгоритмы глубокого обучения, включая BlazePose, которые используются для оценки позы человека и анализа его действий по ключевым точкам [17]. Этот фреймворк возможно применить в сфере строительного производства, где он не только обеспечит быструю и точную обработку информации, но и определит, соответствует ли требованиям по контролю качества деятельность рабочих на строительных объектах. Выбор

в пользу алгоритма LSTM обоснован его способностью к эффективной обработке данных, представленных в форме временных рядов. В контексте строительного производства, где действия рабочих можно выразить через непрерывные временные ряды, алгоритм LSTM демонстрирует высокую эффективность в обучении и выявлении временных особенностей движений, что позволяет точно классифицировать различные виды деятельности [18].

Когда информация о ключевых движениях из временных рядов загружается в сеть LSTM, это дает возможность системе не только отслеживать продолжительность действий рабочих, но и их изменения во времени, предоставляя тем самым более глубокий анализ их профессиональной деятельности. В отличие от других типов машинного обучения, LSTM выделяется своей способностью эффективно обрабатывать временные данные видео, где каждый кадр влияет на анализ следующего, улучшая тем самым точность в распознавании действий. В результате работы сети формируется распределение вероятностей для различных действий, что значительно улучшает классификацию и точность определения активности рабочих.

На сегодняшний день применение систем распознавания движений рабочих на строительной площадке ограничено простыми действиями, такими как ходьба или отсутствие движений, присутствие или отсутствие на рабочем месте, профессиональные навыки рабочего в реальных условиях не контролируются, их можно оценить только в контролируемых лабораторных условиях. Настоящее исследование направлено на разработку системы, способной анализировать действия рабочих для повышения их производительности труда на строительных площадках. Эта система должна обеспечить непрерывный мониторинг производительности труда рабочих на строительной площадке, улучшить сбор сведений, оперативно обнаруживать и решать проблемы по контролю качества реализуемой стро-

ительной продукции, а также создать базу для будущей автоматизированной системы управления строительным производством. Применение этой системы по мониторингу производительности труда рабочих сократит объем брака реализуемой строительной продукции и даст возможность оперативно контролировать уровень квалификации кадров в строительном производстве.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Автоматизированная система анализа действий рабочих на строительных объектах включает три ключевых компонента: модуль распознавания действий и поз строителя, блок классификации действий и компонент для обработки и выделения основных точек.

В рамках последнего компонента эффективно функционирует MediaPipe с интегрированной моделью BlazePose — передовым решением на основе глубокого обучения для оценки человеческой позы. Эта технология успешно идентифицирует 33 анатомические точки на теле, включая плечи, локтевые суставы, запястья, тазобедренную область и коленные суставы. BlazePose работает как со статичными изображениями, так и с динамическим видеоконтентом, обеспечивая широкий спектр возможностей для анализа и отслеживания движений (рис. 1).

Модель BlazePose может определять не только позиции ключевых точек (x, y) на плоскости, но и их удаленность от камеры — координату z . Важно помнить, что эта информация о дистанции приблизительная, так как извлекается из обычного RGB-изображения, а не из специализированных устройств глубинного сканирования. Такая оценка предоставляет лишь общее представление о расположении точек в пространстве, не являясь точной. Если мониторинг деятельности рабочего требует точных данных о пространственном расположении его на строительстве объектов, рекомендуется использовать специальное оборудование с датчиками

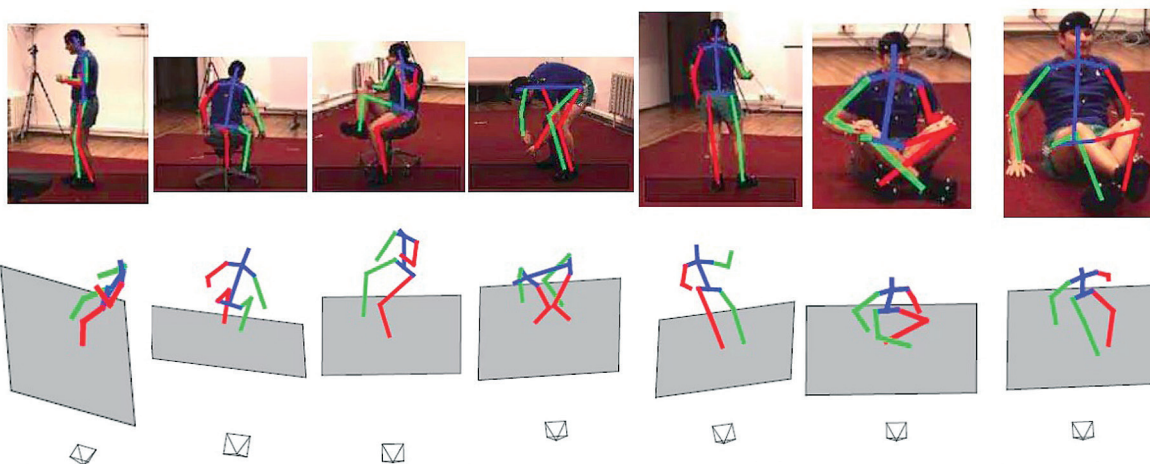


Рис. 1. Модель BlazePose для отслеживания движений человека

Fig. 1. BlazePose model for tracking human movements

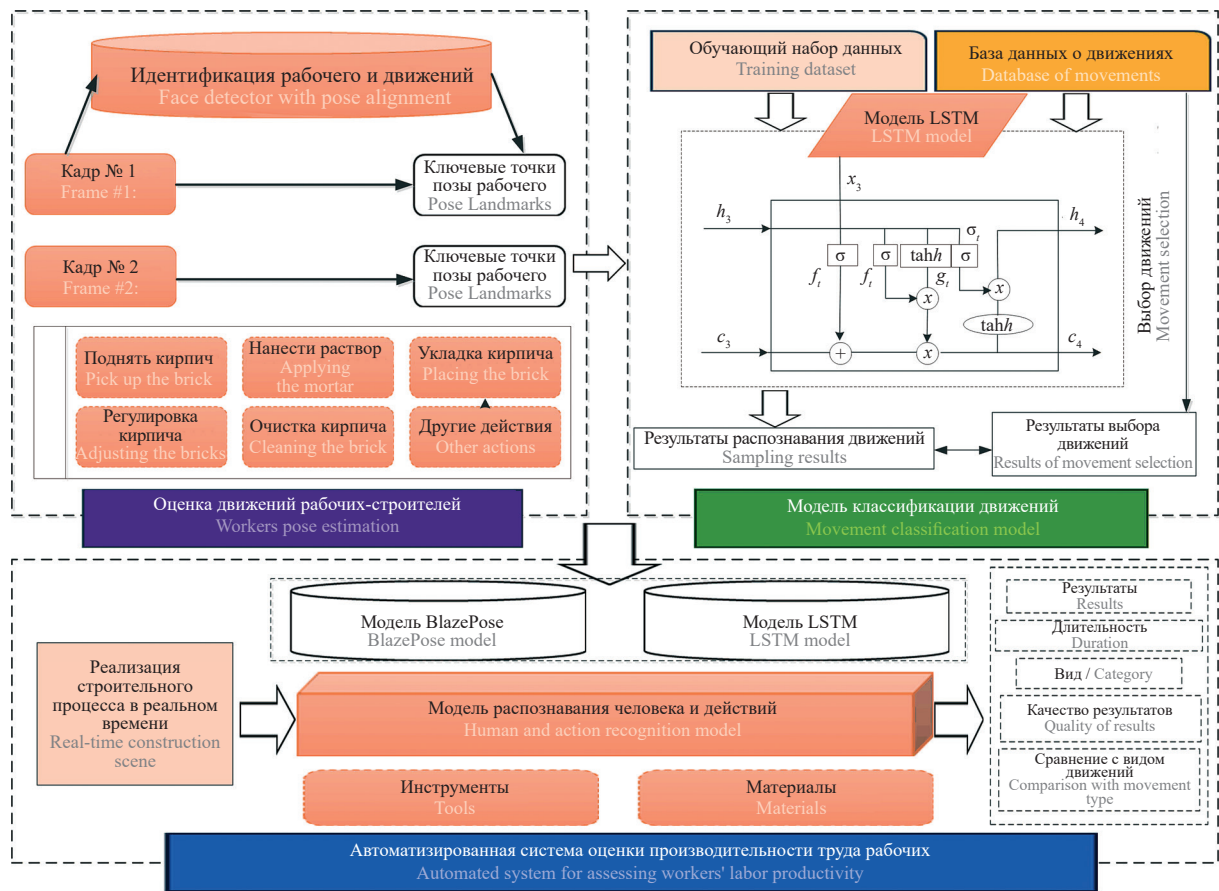


Рис. 2. Автоматизированная система оценки производительности труда в строительстве

Fig. 2. Automated system for assessing labour productivity in construction

глубины, например Intel RealSense T265 или Kinect Sensor [19].

В строительном производстве для распознавания объектов возможно применение алгоритма YOLO. Этот алгоритм позволяет идентифицировать строительные материалы и инструменты, такие как мастерки, кирпичи и строительные леса, в реальном времени. Он обладает высокой точностью и способен классифицировать множество объектов всего за один проход через нейросеть [20]. Уникальность технологии заключается в том, что она адаптирована к условиям строительных площадок, где преимущественно используются стандартные RGB-камеры. Это делает ее внедрение особенно эффективным и практичным в реальных условиях строительства. Применение данного алгоритма обеспечивает оперативное распознавание объектов, их типы и расположение на строительном участке.

В отличие от традиционных методов оценки производительности труда, предлагаемая система компьютерного зрения учитывает даже промежутки бездействия между операциями, обеспечивая непрерывный мониторинг и точное распознавание каждого движения в процессе, например кладки кирпичей. Такой процессный мониторинг значительно обогащает стандартные показатели эффективности, обеспечивая мгновенную обратную связь и создавая

полное представление о реальной производительности на строительной площадке. На рис. 2 показана разработанная схема мониторинга автоматического контроля производительности труда рабочих на строительной площадке.

В условиях реализации строительных работ с большим количеством рабочих на строительной площадке необходимо применять специальную систему идентификации. Каждому работнику присваивается уникальный персональный номер, а его перемещения между кадрами фиксируются благодаря его идентификации моделью. Эта методика объединяет алгоритм прогнозирования траектории движения с анализом визуальных характеристик спецодежды, включая цветовую гамму и фактуру. Технология обеспечивает непрерывное распознавание рабочего даже в случае временной потери визуального контакта или перекрытия другими объектами. Это значительно повышает точность и надежность определения ключевых антропометрических точек в ситуациях, когда на площадке одновременно работает много строителей.

Для аналитических целей создается обширная база данных, в которой хранятся разнообразные характеристики каждого работника — от временных меток и визуальных особенностей до координат ключевых точек. Каждый сотрудник идентифици-

руется по уникальным номерам. Сведения о координатах положения извлекаются в ходе детального анализа ключевых точек. Благодаря возможности классифицировать различные движения и позы можно оценить эффективность и безопасность действий рабочих-строителей. Полученные характеристики предоставляют важную информацию о том, как работники выполняют поставленные задачи и какие движения они совершают.

Эффективность автоматизированной системы оценки производительности труда была протестирована на видео, где производится строительный процесс каменной кладки.

Анализируя работу каменщика, был применен особый подход к обработке видеоматериала. Разбив запись на фрагменты по принципу «одно действие — один отрезок», созданы условия, при которых все компоненты рабочей сцены (каменщик, инвентарь, строительные материалы) сохраняли постоянство в пределах каждого сегмента. Такая методика исключила необходимость учитывать временной фактор при исследовании. В результате процесс анализа информации стал значительно эффективнее, позволяя концентрироваться исключительно на элементах сцены, абстрагируясь от динамических изменений во времени.

Оценка эффективности работы каменщика возможна благодаря делению процесса на временные сегменты. На рис. 3 продемонстрировано пять ключевых этапов деятельности: нанесение, очистка и укладка раствора, а также подъем и укладка кирпича. Четкое распознавание действий достигается путем фрагментации видео в точках, где одно действие сменяется другим. Такая сегментация особенно результативна, поскольку каждая операция имеет явно различимые

границы: будь то момент подъема кирпича, его укладка или работы с раствором. Разбивая запись на такие логические отрезки, появляется возможность детально исследовать каждый элемент рабочего процесса.

При разбивании процесса кладки на пять временных сегментов существенно облегчается понимание каждой стадии работы. Последовательность и необходимость определили выбор именно этих пяти этапов, которые представляют собой фундаментальные компоненты всего процесса. Каждый шаг имеет строго определенные временные рамки и является неотъемлемой частью общей структуры. Для более глубокого осмысления реальных процессов в каждом действии используется теория сцен, анализируются сущности, атрибуты и отношения между ними, что позволяет детально деконструировать каждый этап [21].

Выбор подходящего кирпича требует от строителя точной оценки и бережного захвата. Взаимодействие между работником и материалом определяется весом и габаритами кирпича, что влияет на манеру обращения с ним. Кажущаяся простота этого действия обманчива, для стабильного удержания кирпича необходима превосходная моторика. Строительство стены предполагает учет множества элементов: общей архитектуры конструкции, правильного позиционирования каждого кирпича и оптимальной толщины скрепляющего состава. Эти компоненты формируют сложную систему взаимосвязей между мастером, строительным материалом и возводимой конструкцией.

Контролируя давление и объем материала, специалист обеспечивает надежное скрепление строительных элементов. Эстетичный вид конструкции достигается путем удаления излишков связующего

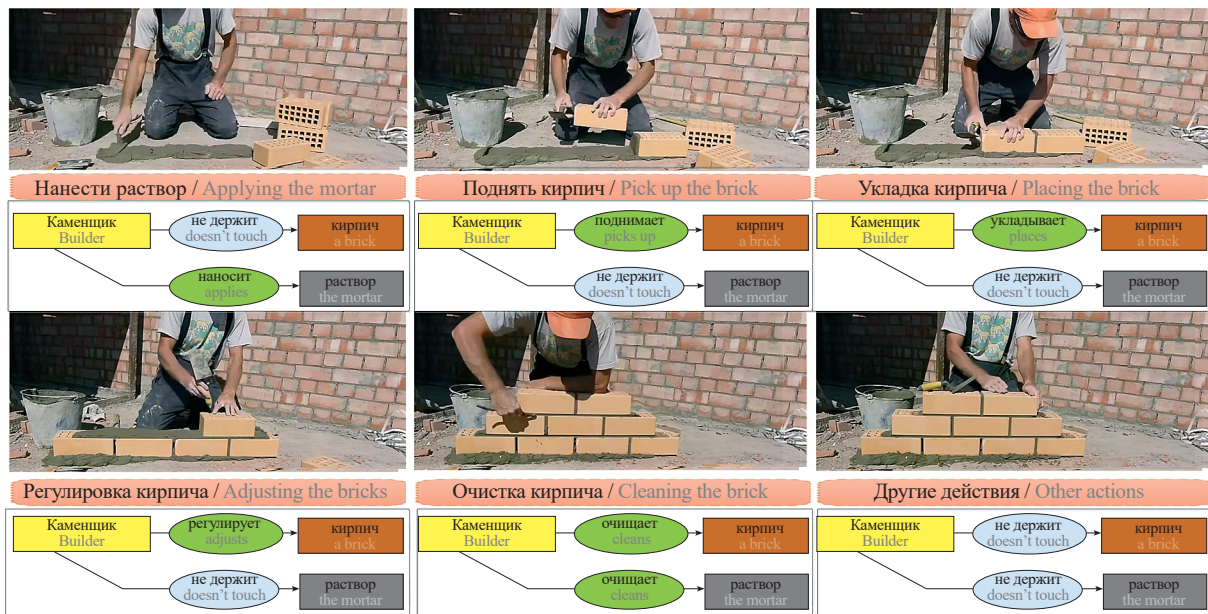


Рис. 3. Визуальное представление процесса кирпичной кладки с отображением этапов и взаимоотношений элементов в сцене

Fig. 3. Visual representation of the bricklaying process showing the stages and relationships

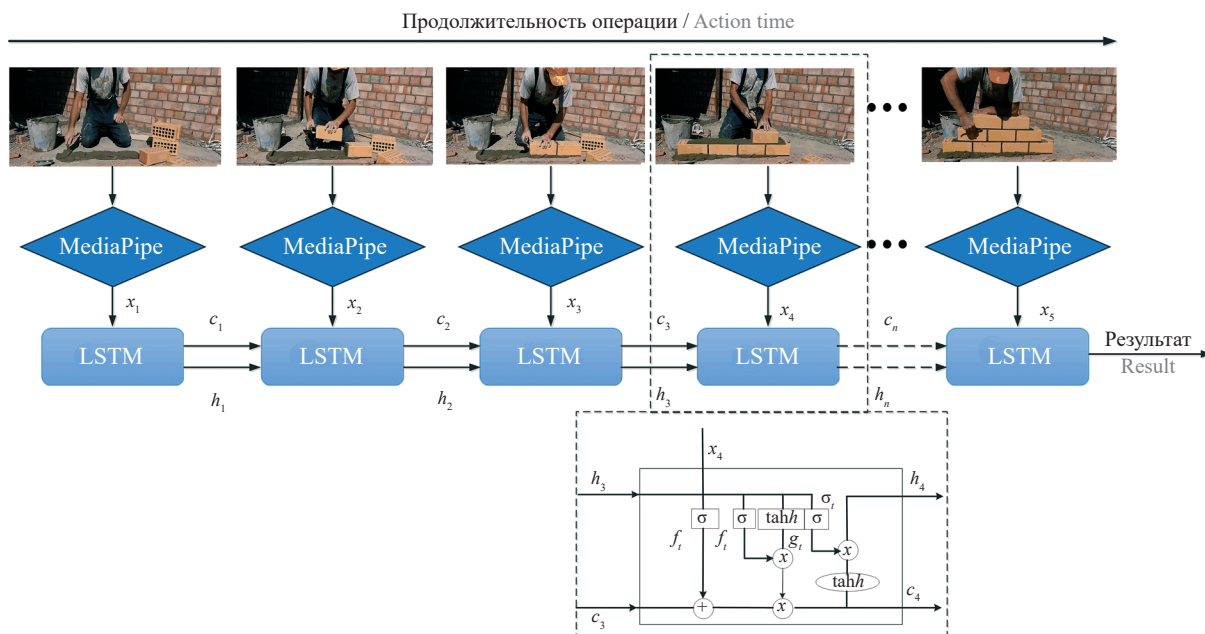


Рис. 4. Применение LSTM-сетей в сочетании с MediaPipe для создания последовательной системы идентификации активностей на основе анализа нескольких кадров

Fig. 4. Application of LSTM networks in combination with MediaPipe to create a sequential activity identification system based on the analysis of multiple frames

состава. Прочность соединений между кирпичами напрямую зависит от тщательной очистки швов. Для равномерного распределения состава по поверхности кирпича каменщик применяет специальный инструментарий, которым предварительно набирает необходимую порцию раствора. Качество сцепления определяется умением мастера адаптировать технику нанесения к особенностям обрабатываемой поверхности.

Детальное изучение пятиэтапного процесса позволяет выявить инструментарий, материалы и внешние факторы каждой стадии, что создает основу для оптимизации труда каменщика. Полученные аналитические данные становятся фундаментом как для теоретического совершенствования рабочих методик, так и для будущего внедрения автоматизированных строительных технологий.

Цифровые технологии формируют новую реальность строительной отрасли. Качество возведения объектов, эффективность рабочих процессов и обеспечение безопасности рабочих-строителей существенно улучшатся благодаря внедрению систем, способных точно идентифицировать и категоризировать различные действия. Это становится фундаментальным элементом в создании интеллектуальных сооружений нового поколения.

Оптимизация строительных процессов требует анализа действий рабочих на объектах. В настоящем исследовании применяются рекуррентные нейросети с архитектурой LSTM (долгая краткосрочная память), которые специализируются на обработке последовательных сведений. Перед подачей в систему координаты ключевых точек тела работ-

ников проходят предварительную обработку — нормализуются для устранения масштабных различий и выравниваются по временным интервалам. Это обеспечивает единообразие входных данных, которые представляют собой временные последовательности положений ключевых точек фигуры рабочего, что позволяет LSTM-модели эффективно распознавать выполняемые действия.

Анализируя последовательные кадры видео, LSTM-сети учитывают предшествующие результаты при обработке новой информации, что значительно повышает эффективность использования временных характеристик. Система распознает и классифицирует различные действия рабочего. Это происходит благодаря способности модели выявлять закономерности и временные зависимости в поступающих данных, формируя на выходе вероятностное распределение возможных действий каменщика.

На рис. 4 показан интегрированный процесс анализа последовательных действий через несколько каналов, объединяющий экстракцию позиций с применением MediaPipe и моделирование последовательностей посредством LSTM-архитектуры. Эта модель демонстрирует превосходство над альтернативными методами машинного обучения в эффективности использования видеохарактеристик для улучшения точностных показателей.

Платформа MediaPipe извлекает существенные параметры, такие как координаты ключевых точек человеческой фигуры, из каждого кадра видеоряда в определенный момент времени, после чего эти данные поступают в LSTM-модель. Используя комбинацию внутренней памяти (состояния яче-

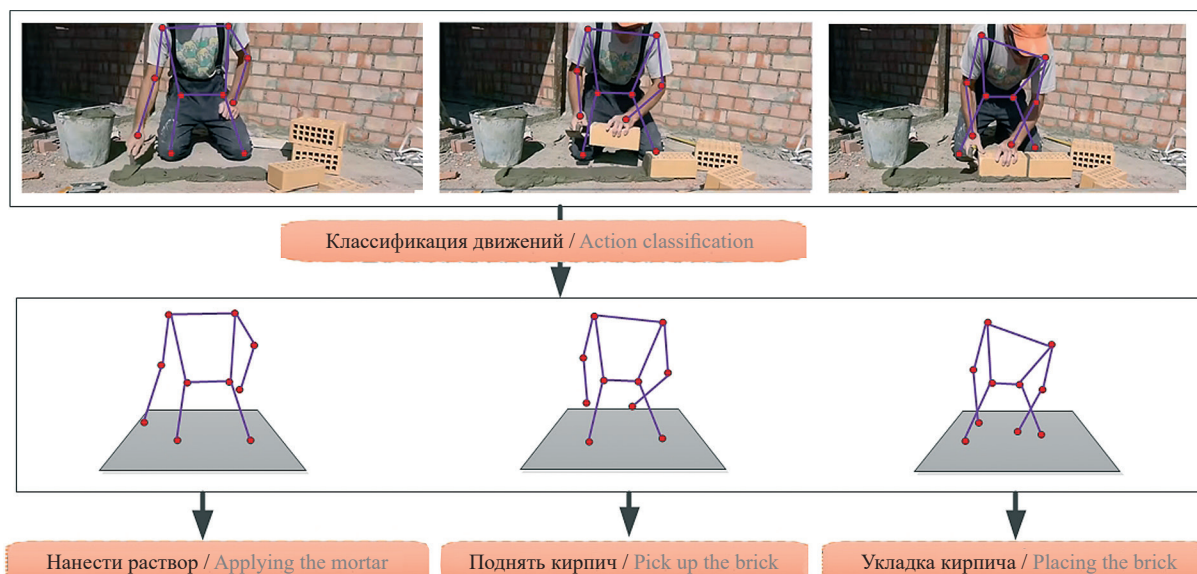


Рис. 5. Схема идентификации движений с помощью алгоритма LSTM

Fig. 5. Motion identification scheme using the LSTM algorithm

ек) и различных вентиляльных механизмов, LSTM-модель осуществляет селективный отбор информации для сохранения, модификации или генерации выходных сведений.

На рис. 5 приведен комплексный механизм идентификации активности, объединяющий анализ положения тела и последовательную обработку через LSTM-архитектуру. Система способна точно классифицировать различные типы деятельности рабочих (включая состояния «бездействие», «подъем предметов» и «размещение предметов в пространстве») в автоматическом режиме, анализируя видеофрагменты. Отслеживая временные изменения в положении тела, нейросеть регистрирует динамические паттерны движений. Результатом работы алгоритма становится точная классификация наблюдаемых действий на основе непрерывного анализа последовательных изменений в позе работника.

Идентификация и мониторинг строительного инвентаря представляют собой неотъемлемый компонент всестороннего исследования строительного процесса, дополняя анализ деятельности каменщика. Предлагаемая система включает применение передовой нейросетевой архитектуры алгоритма YOLO («смотри только один раз»), обеспечивающего мгновенное распознавание предметов. Подготовка алгоритма осуществляется с использованием специализированной выборки, содержащей изображения типичных строительных инструментов — от простых молотков и кирпичей до мастеров и электрооборудования. Результатом работы технологии является визуализация обнаруженных объектов посредством контурных рамок, сопровождаемых вероятностными показателями, определяющими категорию и присутствие инструментов в поле зрения камеры.

Интеграция данных отслеживания строителей с информацией о применении инструментария создает комплексную картину рабочих процессов на объекте. Это позволяет устанавливать четкие связи между конкретными строительными операциями и задействованным оборудованием.

Система, осуществляющая непрерывную идентификацию и контроль инструментов, значительно повышает уровень безопасности на производстве. Руководство получает мгновенные уведомления при выявлении нарушений, к примеру, использование неразрешенного оборудования или нарушение техники безопасности при работе с инструментами, что способствует не только оптимизации управления ресурсами, но и предотвращению потенциально опасных инцидентов.

Всестороннее понимание строительных процессов становится возможным через комплексный анализ сведений. Начинается с идентификации различных рабочих сценариев и затем анализируется информация об используемых инструментах. Далее применяется специально обученная модель для определения конкретных действий строителей на площадке. Объединение технологий отслеживания ключевых точек рабочего, анализа временных рядов для распознавания действий и идентификации объектов в рабочем пространстве позволяет создать детальную картину строительной деятельности на площадке. Такой подход дает возможность исследовать множество факторов эффективности: от строительных операций до влияния окружающих условий и применения инструментария. Завершающий этап — установление корреляции между количественными результатами и признанием достижений, что обеспечивает более точную оценку производительности труда.

Разработанная система верификации строительных процессов требует синхронного подтверждения двух независимых модулей: LSTM-анализатор, обрабатывающий данные о положении тела от модели BlazePose, должен идентифицировать профессиональное поведение рабочего, параллельно алгоритм YOLO обязан обнаружить соответствующий инструмент строительного назначения. Такой принцип «двойной валидации» был специально спроектирован для минимизации ошибочных детекций путем одновременной проверки как позиционирования работника, так и задействованного им инструментария при каждой регистрируемой операции в разработанной системе оценки эффективности.

Однако система имеет недостаток: при невозможности идентификации ожидаемого действия алгоритмами распознавания действий или инструментов система игнорирует это действие полностью. Независимое функционирование двух моделей без взаимодействия и отсутствие корректирующих мер при пропуске обнаружений создает неточность оценки с помощью разработанной системы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модель LSTM применяется для анализа данных временных рядов и выделения признаков для классификации действий. Обучение модели LSTM происходит посредством контролируемого вида обучения. Для этого необходимо вручную разделить видео на фрагменты длительностью 1–2 с и определить шесть типов действий. Сегментированные видео сначала преобразуются в видеокadres с использованием MediaPipe перед подачей на необученную модель LSTM. Для обеспечения точности и предотвращения хаотичного распределения информации вывод сведений проводится каждые 0,25 с.

В процессе обучения модели LSTM данные предварительно делятся на обучающую, проверочную и тестовую выборки в соотношении 7:2:1. Во время обучения видеофрагменты из обучающей выборки последовательно подаются на вход LSTM-модели. LSTM-модель постоянно корректирует свои внутренние весовые параметры, чтобы привести выходные сведения к реальным меткам действий.

На каждом этапе обучения модели вычисляется функция потерь, причем используется функция кросс-энтропии для измерения расхождения между прогнозом модели и реальными действиями. В ходе обучения проверочная выборка применяется для оценки производительности модели, что позволяет корректировать гиперпараметры и предотвращать переобучение. Когда производительность модели на проверочной выборке перестает улучшаться, обучение можно завершить.

В заключительной стадии оценки эффективности обученной модели используется специально подготовленный тестовый набор данных. Это позволяет определить точность и способность модели

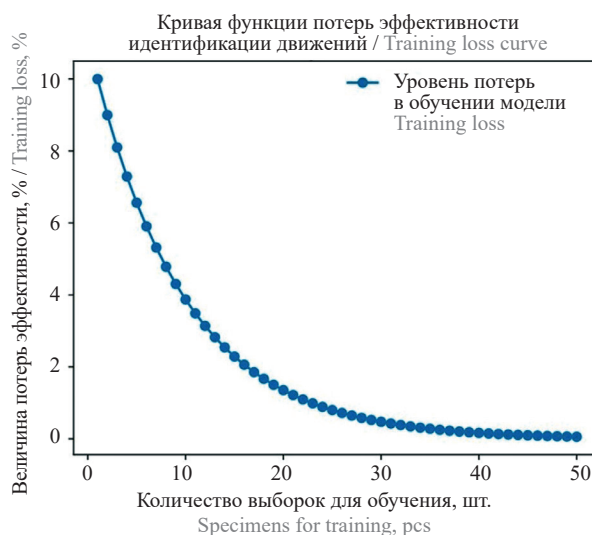


Рис. 6. Оценка эффективности идентификации действий моделью LSTM

Fig. 6. Evaluation of the effectiveness of LSTM action identification

к обобщению в реальных сценариях ее применения. На рис. 6 представлена кривая потерь эффективности идентификации действий моделью LSTM в процессе контролируемого обучения.

По мере обучения кривая функции потерь постепенно становится более гладкой и стремится к уменьшению, приближаясь к нулевому значению. Стабилизация кривой на более низком уровне свидетельствует о том, что разница между прогнозами модели и реальными данными минимальна, а способность модели к прогнозированию значительно улучшилась.

В процессе обучения модель постепенно выявляет закономерности и особенности информации. На этом этапе кривые потерь для обучающей и проверочной выборок должны практически совпадать и стабилизироваться, что свидетельствует о точности прогнозов модели на основе обучающих данных и ее способности к обобщению. Этот процесс указывает на эффективность обучения. Анализируя кривую функции потерь, можно определить момент прекращения обучения, чтобы избежать переобучения от излишнего количества тренировок и обеспечить эффективность модели в реальных задачах.

В результате обучения модели LSTM точность распознавания действий каменщика достигла 80,1 %. Сравнение сведений, полученных с использованием модели, с фактическими данными показывает, что из общей продолжительности видео 58 с реализации каменной кладки строителем на протяжении 46,5 с модель распознает его действия.

В таблице представлены результаты идентификации автоматизированной системой шести действий (нанесение раствора, подъем кирпичей, укладка кирпичей, регулировка кирпичей, очистка кирпичей и прочие действия), что подтверждает эффективность модели.

Результаты идентификации действий автоматизированной системой по тестовым видео

Results of automated system identification of actions based on a test video

Наименование действия Name of the action	Продолжительность действия в видео, с Action duration in the video, s	Доля экранного времени с действием, % Share of screen time with the action, %	Продолжительность действия, идентифицированного моделью LSTM, с Action duration identified by the LSTM model, s	Доля экранного времени с действием, идентифицированным моделью LSTM, % Share of screen time with the action identified by the LSTM model, %
Нанести раствор Applying the mortar	10	17,3	7,75	13,3
Поднять кирпич Pick up the brick	12	20,7	9,5	16,3
Укладка кирпича Placing the brick	7	12	6,5	11,2
Регулировка кирпича Adjusting the bricks	7	12	5,75	10
Очистка кирпича Cleaning the brick	10	17,3	7,5	13
Другие действия Other actions	12	20,7	9,5	16,3

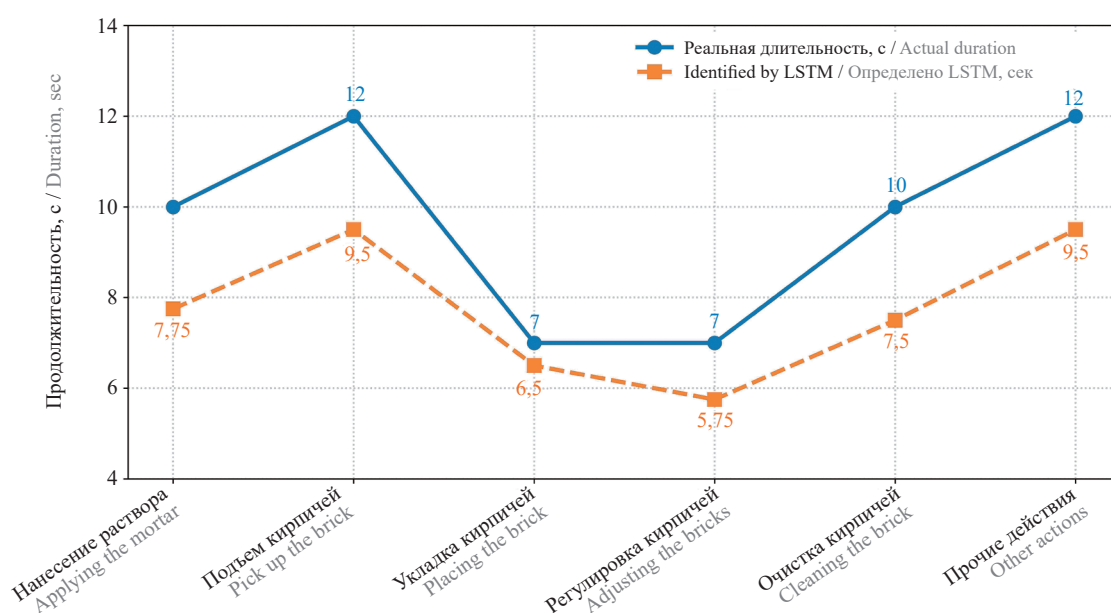


Рис. 7. Результаты идентификации различных видов деятельности при кладке кирпича автоматизированной моделью анализа производительности труда

Fig. 7. Results of identification of different types of activities during bricklaying by an automated labour productivity analysis model

На рис. 7 приведены результаты эффективности идентификации действий различных видов работ при кладке кирпича моделью автоматизированного анализа производительности труда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Благодаря применению модели компьютерного зрения разработана автоматизированная система оценки производительности труда, которая сокращает необходимость в визуальном контроле строительных процессов на строительной площадке и обеспечива-

ет объективный мониторинг показателей в реальном времени.

В ходе проведенного исследования была разработана инновационная система учета продолжительности выполнения работ на строительной площадке и идентификации операций, которая успешно справляется с разнообразными строительными сценариями, включающими участие нескольких исполнителей процессов.

Данная система фиксирует не только информацию о деятельности строителей, но и об используемом оборудовании, технических средствах и других

параметрах производственной среды, что позволяет создать целостную картину строительных операций. Благодаря этому становится возможным выявление непродуктивных участков работы и определение перспектив их оптимизации. Подобный подход демонстрирует преимущество перед традиционными методиками, сосредоточенными на отдельных элементах, обеспечивая более точные и надежные мониторинг и анализ.

Результаты проведенной работы представляют собой не просто способы применения алгоритмов машинного обучения в строительном производстве, а открывают новые перспективы для оптимизации строительных операций, снижения издержек и упрощения управленческих процедур в реальных условиях. Руководители получают ценный инструмент для оптимизации распределения ресурсов и повышения производительности труда благодаря разработанной системе, которая мгновенно выявляет проблемные зоны и неэффективные простои в строительных процессах.

Систематический мониторинг и глубокий анализ информации, полученной в реальном времени, существенно улучшают обоснованность управленческих решений, способствуют эффективному проектированию и своевременной корректировке системы качества на строительной площадке. Полученные выводы открывают перспективы для применения алгоритмов машинного обучения в различных областях строительного производства, что способствует прогрессу в области управления строительным производством и методологии оценки результативности.

Результаты исследования демонстрируют передовую систему мониторинга производительности в строительной отрасли, базирующуюся на технологиях визуального распознавания. Ключевым преимуществом разработки является возможность получения объективных показателей эффективности без необходимости постоянного человеческого контроля. Система осуществляет комплексный мониторинг: от анализа рабочих операций и использования оборудования до учета внешних условий на объекте. Созданные алгоритмы и собранная информационная база с реальных строительных участков обеспечивают высокую надежность измерений и широкие возможности практического внедрения методики.

Работоспособность технологии напрямую связана с оптимальными параметрами среды — качественным светом и грамотной установкой видеоборудования, что представляет сложность в условиях функционирующих строительных территорий.

Развитие сферы применения цифровых технологий в строительном производстве даст возможность усовершенствовать методологию путем расширения исследовательской базы данных, интеграции периферийных технологий и мультисенсорных систем наблюдения. Настоящая работа создает фундамент для цифровизации контроля производительности труда на строительной площадке, что в долгосрочной перспективе даст возможность совершенствования методов производства строительных процессов и способность осуществлять непрерывное наблюдение за строительными объектами и рабочими в режиме реального времени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Xu M., Mei Zh., Luo S., Tan Yi. Optimization Algorithms for Construction Site Layout Planning : a Systematic Literature Review // *Engineering Construction & Architectural Management*. 2020. Vol. 27. Issue 8. Pp. 1913–1938. DOI: 10.1108/ECAM-08-2019-0457. EDN ZQJLJW.

2. Al Hawarneh A., Bendak S., Ghanim F. Dynamic Facilities Planning Model for Large Scale Construction Projects // *Automation in Construction*. 2019. Vol. 98. Pp. 72–89. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.11.021

3. Kaveh A., Vazirinia Y. Construction Site Layout Planning Problem Using Metaheuristic Algorithms : a Comparative Study // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2019. Vol. 43. Issue 2. Pp. 105–115. DOI: 10.1007/s40996-018-0148-6

4. Jaafar K., Elbarkouky R., Kennedy J. Construction Site Layout Optimization Model Considering Cost and Safety in a Dynamic Environment // *Asian Journal of Civil Engineering*. 2021. Vol. 22. Issue 2. Pp. 297–312. DOI: 10.1007/s42107-020-00314-3. EDN ASHFQJ.

5. Prayogo D., Cheng M.Yu., Wu Yu.W., Redi A.A.N.P., Yu V.F., Persada S.F. et al. A Novel Hybrid Metaheuristic Algorithm for Optimization of Construction Management Site Layout Planning // *Algorithms*. 2020. Vol. 13. Issue 5. P. 117. DOI: 10.3390/a13050117. EDN VOBMGW.

6. Arshad S., Akinade O., Bello S., Bilal M. Computer Vision and IoT Research Landscape for Health and Safety Management on Construction Sites // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 76. P. 107049. DOI: 10.1016/j.job.2023.107049. EDN ZQJSLG.

7. Tian Yu., Chen J., Kim Ju.In., Kim J. Lightweight Deep Learning Framework for Recognizing Construction Workers' Activities Based on Simplified Node Combinations // *Automation in Construction*. 2024. Vol. 158. P. 105236. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105236. EDN PITKJM.

8. Baek J., Kim D., Choi B. Deep Learning-Based Automated Productivity Monitoring for on-Site Module Installation in off-Site Construction // *Developments in the Built Environment*. 2024. Vol. 18. P. 100382. DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100382. EDN TOTRVH.

9. Chen X., Wang Y., Wang J., Bouferguene A., Al-Hussein M. Vision-Based Real-Time Process Monitoring and Problem Feedback for Productivity-Oriented Analysis in off-Site Construction // *Automation in Construction*. 2024. Vol. 162. P. 105389. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105389. EDN INIOZE.
10. Qi K., Owusu E.K., Francis Siu M.F., Albert Chan P.Ch. A Systematic Review of Construction Labor Productivity Studies: Clustering and Analysis through Hierarchical Latent Dirichlet Allocation // *Ain Shams Engineering Journal*. 2024. Vol. 15. Issue 9. P. 102896. DOI: 10.1016/j.asej.2024.102896. EDN NKMMDC.
11. Zhang M., Zhou Ya., Xu X., Ren Z., Zhang Y., Liu Sh. et al. Multi-View Emotional Expressions Dataset Using 2D Pose Estimation // *Scientific Data*. 2023. Vol. 10. Issue 1. P. 649. DOI: 10.1038/s41597-023-02551-y. EDN ISMSVS.
12. Bora J., Dehingia S., Boruah A., Chetia A.A., Gogoi D. Real-Time Assamese Sign Language Recognition Using MediaPipe and Deep Learning // *Procedia Computer Science*. 2023. Vol. 218. Pp. 1384–1393. DOI: 10.1016/j.procs.2023.01.117. EDN EWJOKP.
13. Sundar B., Bagyammal T. American Sign Language Recognition for Alphabets Using MediaPipe and LSTM // *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 215. Pp. 642–651. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.066. EDN SCJTAC.
14. Kikuta T., Chun P. Development of an Action Classification Method for Construction Sites Combining Pose Assessment and Object Proximity Evaluation // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2024. Vol. 15. Issue 4. Pp. 2255–2267. DOI: 10.1007/s12652-024-04753-7. EDN KRRKHU.
15. Jang Y., Jeong I., Younesi Heravi M., Sarkar S., Shin H., Ahn Y. Multi-Camera-Based Human Activity Recognition for Human–Robot Collaboration in Construction // *Sensors*. 2023. Vol. 23. Issue 15. P. 6997. DOI: 10.3390/s23156997. EDN ROYSYQ.
16. Xiao B., Zhang Y., Chen Y., Yin X. A Semi-Supervised Learning Detection Method for Vision-Based Monitoring of Construction Sites by Integrating Teacher-Student Networks and Data Augmentation // *Advanced Engineering Informatics*. 2021. Vol. 50. P. 101372. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101372. EDN HHONZJ.
17. Chen C., Zhu Z., Hammad A. Automated Excavators Activity Recognition and Productivity Analysis from Construction Site Surveillance Videos // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 110. P. 103045. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.103045. EDN BMUNVW.
18. Alashhab S., Gallego A.J., Lozano M.Á. Efficient Gesture Recognition for the Assistance of Visually Impaired People Using Multi-Head Neural Networks // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2022. Vol. 114. P. 105188. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105188. EDN RLLYMM.
19. Гладышев М.Д., Рыбаков А.В. Интеграция сенсорных данных и математическое моделирование поведения подводного робота с использованием цифрового двойника // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025. Т. 25. № 2. С. 142–151. DOI: 10.23947/2687-1653-2025-25-2-142-151. EDN LDXARH.
20. Алтамова М.В., Рудяк Ю.В. Оптимальная 2D-расстановка виртуальных объектов в физическом пространстве для приложений дополненной реальности // *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023. Т. 23. № 4. С. 410–421. DOI: 10.23947/2687-1653-2023-23-4-410-421. EDN QPFEMG.
21. Каракозова И.В., Лисицын И.М., Болдышев К.В. Методы проектирования рабочих операций в условиях внедрения цифровых технологий в строительстве // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 8. С. 1373–1389. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1373-1389. EDN GXBZQY.

Поступила в редакцию 22 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 28 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 28 января 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Светлана Евгеньевна Манжилевская** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий и организации строительства; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 344001, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; SPIN-код: 9612-8379, Scopus: 57194619278, ResearcherID: AAB-6899-2021, ORCID: 0000-0001-7065-3726; smanzhilevskaya@yandex.ru.

REFERENCES

1. Xu M., Mei Zh., Luo S., Tan Yi. Optimization Algorithms for Construction Site Layout Planning : a Systematic Literature Review. *Engineering Construction & Architectural Management*. 2020; 27(8):1913-1938. DOI: 10.1108/ECAM-08-2019-0457. EDN ZQJLJW.
2. Al Hawarneh A., Bendak S., Ghanim F. Dynamic Facilities Planning Model for Large Scale Construction Projects. *Automation in Construction*. 2019; 98:72-89. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.11.021
3. Kaveh A., Vazirinia Y. Construction Site Layout Planning Problem Using Metaheuristic Algorithms : a Comparative Study. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2019; 43(2):105-115. DOI: 10.1007/s40996-018-0148-6

4. Jaafar K., Elbarkouky R., Kennedy J. Construction Site Layout Optimization Model Considering Cost and Safety in a Dynamic Environment. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2021; 22(2):297-312. DOI: 10.1007/s42107-020-00314-3. EDN ASHFQJ.
5. Prayogo D., Cheng M.Yu., Wu Yu.W., Redi A.A.N.P., Yu V.F., Persada S.F. et al. A Novel Hybrid Metaheuristic Algorithm for Optimization of Construction Management Site Layout Planning. *Algorithms*. 2020; 13(5):117. DOI: 10.3390/a13050117. EDN VOBMGW.
6. Arshad S., Akinade O., Bello S., Bilal M. Computer Vision and IoT Research Landscape for Health and Safety Management on Construction Sites. *Journal of Building Engineering*. 2023; 76:107049. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107049. EDN ZQJSLG.
7. Tian Yu., Chen J., Kim Ju.In., Kim J. Lightweight Deep Learning Framework for Recognizing Construction Workers' Activities Based on Simplified Node Combinations. *Automation in Construction*. 2024; 158:105236. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105236. EDN PITKJM.
8. Baek J., Kim D., Choi B. Deep Learning-Based Automated Productivity Monitoring for on-Site Module Installation in off-Site Construction. *Developments in the Built Environment*. 2024; 18:100382. DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100382. EDN TOTRVH.
9. Chen X., Wang Y., Wang J., Bouferguene A., Al-Hussein M. Vision-Based Real-Time Process Monitoring and Problem Feedback for Productivity-Oriented Analysis in off-Site Construction. *Automation in Construction*. 2024; 162:105389. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105389. EDN INIOZE.
10. Qi K., Owusu E.K., Francis Siu M.F., Albert Chan P.Ch. A Systematic Review of Construction Labor Productivity Studies: Clustering and Analysis through Hierarchical Latent Dirichlet Allocation. *Ain Shams Engineering Journal*. 2024; 15(9):102896. DOI: 10.1016/j.asej.2024.102896. EDN NKMMDC.
11. Zhang M., Zhou Ya., Xu X., Ren Z., Zhang Y., Liu Sh. et al. Multi-View Emotional Expressions Dataset Using 2D Pose Estimation. *Scientific Data*. 2023; 10(1):649. DOI: 10.1038/s41597-023-02551-y. EDN ISMSVS.
12. Bora J., Dehingia S., Boruah A., Chetia A.A., Gogoi D. Real-Time Assamese Sign Language Recognition Using MediaPipe and Deep Learning. *Procedia Computer Science*. 2023; 218:1384-1393. DOI: 10.1016/j.procs.2023.01.117. EDN EWJOKP.
13. Sundar B., Bagyammal T. American Sign Language Recognition for Alphabets Using MediaPipe and LSTM. *Procedia Computer Science*. 2022; 215:642-651. DOI: 10.1016/j.procs.2022.12.066. EDN SCJTAC.
14. Kikuta T., Chun P. Development of an Action Classification Method for Construction Sites Combining Pose Assessment and Object Proximity Evaluation. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2024; 15(4):2255-2267. DOI: 10.1007/s12652-024-04753-7. EDN KRRKHU.
15. Jang Y., Jeong I., Younesi Heravi M., Sarkar S., Shin H., Ahn Y. Multi-Camera-Based Human Activity Recognition for Human-Robot Collaboration in Construction. *Sensors*. 2023; 23(15):6997. DOI: 10.3390/s23156997. EDN ROYSYQ.
16. Xiao B., Zhang Y., Chen Y., Yin X. A Semi-Supervised Learning Detection Method for Vision-Based Monitoring of Construction Sites by Integrating Teacher-Student Networks and Data Augmentation. *Advanced Engineering Informatics*. 2021; 50:101372. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101372. EDN HHONZJ.
17. Chen C., Zhu Z., Hammad A. Automated Excavators Activity Recognition and Productivity Analysis from Construction Site Surveillance Videos. *Automation in Construction*. 2020; 110:103045. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.103045. EDN BMUNVW.
18. Alashhab S., Gallego A.J., Lozano M.Á. Efficient Gesture Recognition for the Assistance of Visually Impaired People Using Multi-Head Neural Networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2022; 114:105188. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105188. EDN RLLYMM.
19. Gladyshev M.D., Rybakov A.V. Integration of sensor data and mathematical modeling of underwater robot behavior using a digital twin. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025; 25(2):142-151. DOI: 10.23947/2687-1653-2025-25-2-142-151. EDN LDXARH. (rus.).
20. Alpatova M.V., Rudyak Yu.V. Optimal 2D placement of virtual objects in physical space for augmented reality applications. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023; 23(4):410-421. DOI: 10.23947/2687-1653-2023-23-4-410-421. EDN QPFEMG. (rus.).
21. Karakozova I.V., Lisitsyn I.M., Boldyshev K.V. Methods of designing work operations in the conditions of digital technologies implementation in the construction industry. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(8):1373-1389. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.8.1373-1389. EDN GXBZQY. (rus.).

Received October 22, 2025.

Adopted in revised form on October 28, 2025.

Approved for publication on January 28, 2026.

B I O N O T E S : Svetlana E. Manzhilevskaya — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Technologies and Organization; Don State Technical University (DSTU); 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344001, Russian Federation; SPIN-code: 9612-8379, Scopus: 57194619278, ResearcherID: AAB-6899-2021, ORCID: 0000-0001-7065-3726; smanzhilevskaya@yandex.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.003.12

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.833-848

Формирование сметной документации на основе цифровой информационной модели для целей государственной экспертизы

Елена Владиславовна Кац¹, Нина Евгеньевна Смелницкая²

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

² *Региональные коммунальные системы; г. Балашиха, Московская область, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Формирование сметной документации (СД) объектов капитального строительства (ОКС) является одним из ключевых процессов инвестиционно-строительной деятельности, напрямую влияющим на достоверность определения стоимости и результаты государственной экспертизы. В условиях внедрения технологий информационного моделирования (ТИМ) возникает необходимость разработки методологических подходов к формированию СД на основе цифровых информационных моделей. Актуальность исследования обусловлена отсутствием единой методологической модели, обеспечивающей согласованность нормативных требований, структуры цифровых моделей и сметно-нормативной базы.

Материалы и методы. Методологическую основу исследования составили анализ нормативно-правовых актов Российской Федерации, научных публикаций отечественных и зарубежных авторов, а также практики проведения государственной экспертизы. Применены методы анализа, синтеза, классификации, формализации и информационного моделирования. Моделирование процессов выполнено с использованием нотации BPMN.

Результаты. Проведен анализ типовых замечаний органов государственной экспертизы, выявлены их системные причины, связанные с несогласованностью проектной и сметной информации. Выполнено сравнение традиционного и ТИМ-ориентированного подходов к формированию СД, показаны преимущества использования ЦИМ. Проанализированы функциональные возможности отечественного ТИМ-сметного программного обеспечения и выявлены ограничения, препятствующие полной автоматизации процессов. Предложена концептуальная модель формирования СД, включающая нормативный, информационный, программный уровни и уровень экспертизы.

Выводы. Результаты исследования подтверждают необходимость разработки единой методологической модели формирования СД из ЦИМ. Предложенная концептуальная модель обеспечивает систематизацию процессов и сохранение структурных и семантических связей данных, что способствует повышению качества СД и эффективности проведения государственной экспертизы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровая информационная модель, сметная документация, технологии информационного моделирования, государственная экспертиза, ценообразование в строительстве, ведомость объемов работ, ТИМ-сметное программное обеспечение, автоматизация сметных расчетов, BIM, 5D-моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кац Е.В., Смелницкая Н.Е. Формирование сметной документации на основе цифровой информационной модели для целей государственной экспертизы // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 833–848. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.833-848

Автор, ответственный за переписку: Елена Владиславовна Кац, KatsEV@mgsu.ru.

Preparation of cost estimate documentation based on a digital information model for the purposes of state expertise

Elena V. Kats¹, Nina E. Smelnitskaya²

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

² *Regional utility systems; Balashikha, Moscow region, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The preparation of cost estimate documentation for capital construction projects is one of the key processes in investment and construction activities, directly affecting the accuracy of cost determination and the outcomes of state expert review. In the context of the implementation of Building Information Modelling (BIM) technologies, there is a need to develop methodological approaches to the preparation of cost estimate documentation based on digital information models.

Materials and methods. The methodological basis of the study includes the analysis of regulatory legal acts of the Russian Federation, scientific publications of Russian and international authors, as well as the practice of state expert review. The following research methods were applied: analysis, synthesis, classification, formalization, and information modelling. Process modelling was carried out using BPMN notation.

Results. An analysis of typical comments from state expert review bodies was conducted, and their systemic causes related to inconsistencies between design and cost estimate information were identified. A comparison of traditional and BIM-based approaches to cost estimate preparation was performed, demonstrating the advantages of using digital information models. The functional capabilities of domestic BIM-based cost estimation software were analyzed, and limitations preventing full automation were identified. A conceptual model for cost estimate documentation preparation was proposed, including regulatory, information, software, and expert review levels.

Conclusions. The results confirm the need to develop a unified methodological model for preparing cost estimate documentation based on digital information models. The proposed conceptual model ensures the structuring of processes and preservation of structural and semantic data relationships, contributing to improved quality of cost estimate documentation and increased efficiency of state expert review.

KEYWORDS: building information model, cost estimate documentation, building information modelling, state expert review, construction cost estimation, bill of quantities, BIM-based cost estimation software, automation of cost estimation, BIM, 5D modelling

FOR CITATION: Kats E.V., Smelnitskaya N.E. Preparation of cost estimate documentation based on a digital information model for the purposes of state expertise. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5): 833-848. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.833-848 (rus.).

Corresponding author: Elena V. Kats, KatsEV@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Ценообразование объекта капитального строительства (ОКС) — это один из самых важных процессов на всех этапах инвестиционно-строительной деятельности. Цель этого процесса состоит в том, чтобы определить стоимость с максимально возможной степенью достоверности с учетом актуальной проектной документации (ПД), а также результатов оценки рисков. Качество проектно-сметной документации (ПСД) определяется соответствием требованиям, установленным нормативными актами Российской Федерации. Контроль качества за соответствием осуществляется путем проведения экспертизы. Следует подчеркнуть, что ошибки, которые были допущены во время оценки стоимости строительства ОКС и не были обнаружены в ходе экспертизы, могут повлечь за собой административную или даже уголовную ответственность при наличии признаков завышения, нецелевого использования средств или подлога. Улучшение качества выполнения сметной документации (СД) является одной из важнейших задач в строительной отрасли.

Исходя из официальной информации, размещенной на сайте Федерального автономного учреждения «Главное управление государственной экспертизы» (далее — ФАУ «Главгосэкспертиза России»)¹, за 9 месяцев 2025 г. количество отрицательных заключений составило 15,0%, за 2024 г. — 5,0%.

Данное увеличение было достигнуто в том числе и из-за введения в действие с 1 января 2025 г. Постановления Правительства Российской Федерации от 28.12.2024 № 1967 «О внесении изменений в Постановление Правительства Российской Федерации от 4 апреля 2022 г. № 579»², отменяющего возмож-

ность неоднократного продления срока прохождения государственной экспертизы ПД и инженерных изысканий. В соответствии с п. 29 Постановления Правительства Российской Федерации от 05.03.2007 № 145 (ред. от 15.09.2023) «О порядке организации и проведения государственной экспертизы проектной документации и результатов инженерных изысканий»³ срок проведения государственной экспертизы в объеме проверки достоверности определения сметной стоимости составляет 30 рабочих дней.

Введение Постановления Правительства РФ от 28.12.2024 № 1967 привело к повышению требований к качеству ПД при подаче в экспертизу, вследствие чего проектные организации вынуждены проводить внутреннюю оценку проектов на наличие ошибок и несоответствий.

До 2024 г. порядок осуществления государственной экспертизы СД ОКС имел стандартный подход, т.е. без применения технологий информационного моделирования (ТИМ). Он заключался в анализе экспертами текстовой (пояснительные записки) и графической (двухмерные чертежи, схемы, таблицы) информации на соответствие нормативно-правовым актам.

Снижение сроков продолжительности экспертизы на текущий момент невозможно без ухудшения ее качества, что ведет к необходимости пересмотра подходов к процессу ее организации. В качестве возможных решений рассматривается переход к полуавтоматизированному, а в будущем и автоматизированному подходу выполнения экспертизы (с помощью специализированных программных комплексов (ПК)), при условии предоставления СД с применением ТИМ. Сметная документация в формате цифровой информационной модели (ЦИМ), входящей в состав информационной модели (ИМ),

¹ Аналитика и статистика. URL: <https://gge.ru/analytics/gosudarstvennaya-ekspertiza/>

² О внесении изменений в Постановление Правительства Российской Федерации от 4 апреля 2022 г. № 579 : Постановление Правительства Российской Федерации от 28.12.2024 № 1967. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202412290018>

³ О порядке организации и проведения государственной экспертизы проектной документации и результатов инженерных изысканий : Постановление Правительства Российской Федерации от 05.03.2007 № 145 (ред. от 15.09.2023). URL: <https://base.garant.ru/12152341>

позволит повысить качество и точность расчета стоимости ОКС.

Изучение методов управления строительными проектами, основанных на интеграции стоимостных параметров в ИМ ОКС, — одно из активно развивающихся направлений современных исследований в области технологий информационного моделирования. В зарубежной научной литературе значительное внимание уделяется вопросам использования ЦИМ для оценки стоимости строительства, управления затратами и формирования сметной информации на различных стадиях жизненного цикла (ЖЦ) объекта. К числу таких исследований относятся работы А. Fazeli и соавт., В. Rouhanizadeh и соавт. и других авторов [1–27].

В отечественных научных исследованиях вопросы интеграции технологий информационного моделирования и сметного нормирования анализируются авторами В.В. Соколовой, Д.Д. Шершневой [28]; Н.А. Смирновой, В.В. Судариковым [29]; В.В. Малаховой и О.Н. Замши [30]; И.А. Тюриным и А.В. Гинзбург [31, 32]; Д.И. Хайминым, Е.М. Ещенко, И.А. Алешиной [33, 34]; А.В. Игнатьевым, В.А. Боркуновым, Е.А. Рябовой [35]; Е.А. Ждановой [36], а также Е.В. Макиша [37]. Указанные труды посвящены различным аспектам применения технологий информационного моделирования при формировании проектной и СД, а также вопросам повышения точности определения стоимости строительства за счет использования данных цифровых моделей.

Анализ зарубежных и российских научных публикаций показывает, что внедрение технологий информационного моделирования в процессы управления стоимостью строительства дает возможность повысить достоверность расчетов, обеспечить прозрачность формирования сметной стоимости и сократить влияние человеческого фактора при определении объемов работ и стоимости ресурсов. При этом одним из ключевых условий эффективного использования ЦИМ для целей стоимостного анализа служит разработка правил стандартизации и нормирования информации, извлекаемой из ИМ.

В Российской Федерации вопросы методического обеспечения применения технологий информационного моделирования находятся в сфере внимания органов государственной власти, профессиональных организаций и экспертного сообщества. Особое значение при этом приобретает развитие подходов к формированию СД при разработке ПД с использованием ТИМ. В этом направлении один из наиболее активных субъектов — г. Москва.

Так, экспертными организациями (ФАУ «Главгосэкспертиза России», ГАУ «Московская государственная экспертиза») были разработаны методические рекомендации по подготовке ИМ раздела ПД «Смета на строительство объектов капитального

строительства» и «Смета на строительство» для организации и проведения государственной экспертизы СД, представленной в формате ИМ.

Кроме того, в целях методического обеспечения процесса формирования СД при разработке ПД с использованием ТИМ Комитетом г. Москвы по ценовой политике в строительстве и государственной экспертизе проектов разработан и утвержден ряд методических документов. В частности, приказами Комитета от 13.04.2023 № МКЭ-ОД/23-45⁴ и № МКЭ-ОД/23-46⁵ утверждены методики МОС.01.02-007.2023 «Методика по адаптации и параметризации сметных норм, расценок и материальных ресурсов для использования при разработке проектно-сметной документации с применением технологий информационного моделирования» и МОС.01.02-008.2023 «Методика по применению параметризованных норм, расценок и материальных ресурсов при разработке проектно-сметной документации с использованием технологий информационного моделирования». Указанные документы направлены на развитие практики применения параметризованных сметных нормативов при формировании СД на основе ИМ.

Несмотря на развитие нормативной и методической базы, а также расширение практики применения ТИМ в строительной отрасли, сегодня отсутствует единая методологическая модель формирования СД в форме ЦИМ ОКС, учитывающая требования нормативного регулирования, структуру сметно-нормативной базы и функциональные возможности существующего программного обеспечения (ПО). Отсутствие такой модели затрудняет обеспечение целостности и согласованности проектной и сметной информации при использовании ЦИМ, а также ограничивает возможности автоматизации процессов проверки достоверности определения сметной стоимости.

В связи с этим целью настоящего исследования является разработка концептуальных положений методологической модели формирования СД из цифровой информационной модели объекта капитального строительства для целей государственной экспертизы.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

⁴ Об утверждении Методики по адаптации и параметризации сметных норм, расценок и материальных ресурсов для использования при разработке проектно-сметной документации с применением технологии информационного моделирования : Приказ от 13.04.2023 № МКЭ-ОД/23-45. URL: <https://www.mos.ru/mke/documents/prikazy/view/285292220/>

⁵ Об утверждении Методики по применению параметризованных норм, расценок и материальных ресурсов при разработке проектно-сметной документации с использованием технологий информационного моделирования : Приказ от 13.04.2023 № МКЭ-ОД/23-46. URL: <https://www.mos.ru/mke/documents/prikazy/view/285293220/>

- проанализировать нормативно-правовую и методическую базу РФ, регламентирующую применение ТИМ при формировании СД и проведении государственной экспертизы;

- выполнить анализ типовых замечаний органов государственной экспертизы в части проверки достоверности определения сметной стоимости ОКС и выявить их основные причины;

- исследовать процессы формирования СД в традиционном и ТИМ-ориентированном подходах и установить их ключевые различия;

- провести анализ функциональных возможностей отечественного ТИМ-сметного ПО и выявить ограничения его применения при автоматизации формирования СД;

- выявить системные противоречия, возникающие при взаимодействии нормативных требований, структуры сметно-нормативной базы, ЦИМ и используемых форматов обмена данными;

- сформулировать методологические принципы формирования СД на основе ЦИМ, обеспечивающие сохранение структурных и семантических связей данных при осуществлении государственной экспертизы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методологической основой исследования послужили: обзор российских и зарубежных авторов в области ценообразования с применением ТИМ, а также нормативно-правовые акты РФ, регламентирующие процесс формирования СД и прохождение экспертизы.

В качестве инструментов исследования использовались методы научного познания: анализ, синтез, эксперимент, классификация, информационное моделирование и формализация.

Метод анализа применялся при:

- оценке законодательных аспектов применения ТИМ при формировании СД;

- сборе информации о проведении государственной экспертизы в части проверки достоверности определения сметной стоимости ОКС в форме ИМ;

- рассмотрении способов получения СД с применением ТИМ и без применения ТИМ;

- обзоре ПО.

В результате синтеза в исследовании проведены связи между нормативно-правовыми актами РФ и влиянием их на формирование СД.

Применена классификация выявленных замечаний по результатам экспертизы достоверности определения сметной стоимости ОКС.

Для процессов формирования СД как в традиционном формате, так и с применением информационного моделирования, был использован метод формализации. Моделирование соответствующих бизнес-процессов выполнялось в соответствии со стандартом BPMN.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ замечаний органов государственной экспертизы в части проверки достоверности определения сметной стоимости ОКС

Качество СД важно, так как от него зависят точность бюджета, сроки выполнения проекта и прозрачность затрат.

На качество СД влияют следующие аспекты:

- 1) полное описание работ;
- 2) корректный расчет стоимости;
- 3) использование актуальных цен;
- 4) правильное оформление;
- 5) учет дополнительных расходов;
- 6) проверка и контроль качества;
- 7) прозрачность и объяснение;
- 8) оценка рисков;
- 9) соблюдение законодательства.

Чтобы повысить качество ПД и сократить сроки экспертизы в рамках данного исследования определены основные (ключевые) замечания по результатам проверки достоверности сметной стоимости.

Основные виды замечаний:

- 1) замечания к ведомости объемов работ (ВОР);
- 2) замечания к сметным расчетам;
- 3) замечания к прилагаемым документам.

Далее представлен анализ каждого из трех видов выявленных замечаний, а также предложены стратегии их устранения посредством внедрения ТИМ.

Замечания к ведомости объемов работ:

- представленные в составе документации ВОР являются продуктом сметной программы, составлены на основе локальных смет (приведены полные наименования расценок вместо конкретного описания фактически выполняемых видов работ с раскрытием технологии их выполнения);

- единицы измерения объемов не соответствуют проектной документации, необоснованно составлены в единицах измерения сметных норм (100 м², 1000 м³, 1000 шт. и т.п.), а не в натуральных показателях;

- не в полной мере корреспондируются с локальными сметными расчетами (ЛСР) в части объемов и видов работ;

- не содержат расчеты физических объемов работ (основанных на представленных проектных решениях);

- не содержат значительную часть сведений о марках, типах, видах и расходах основных материалов, конструкций, изделий, соответствующих проектным решениям.

Для минимизации ошибок, связанных с ручным вводом данных, рекомендуется применять информационное моделирование зданий при создании ВОР. В рамках применения ТИМ ведомости объемов работ интегрируются в структуру информационных моделей зданий. Автоматизированное извлечение объемов из трехмерных моделей позволяет в даль-

нейшем передавать эти сведения в программы для составления смет и системы управления проектами.

Кроме того, с 11 января 2025 г. ведомости объемов работ должны представляться для проведения экспертизы только в формате XML, что также способствует минимизации подобных ошибок.

Замечания к сметным расчетам:

- допускаются арифметические ошибки при расчетах в локальных сметах и в сводном сметном расчете;

- не учитываются единицы измерения в расценках, в том числе часто путают понятия «м трубы» и «м трубопровода» и т.д.;

- представленные объектные и локальные сметы в формате ГГЭ (GGE) не соответствуют представленным в формате PDF и учтенным в сводном сметном расчете стоимости строительства (ССРСС);

- в ЛСР расход некоторых строительных ресурсов (щебень и т.д.) не соответствует сметным нормам и проектным решениям. Например, расход щебня учтен в тоннах, тогда как сметными нормами предусмотрено в кубических метрах.

Создание ИМ помогает устранить арифметические ошибки при расчетах в локальных сметах и в сводном сметном расчете за счет автоматизации расчетов объемов работ и назначения сметных норм элементам из модели.

Использование информационной модели — способ решить проблему с неправильным учетом единиц измерения в расценках, в том числе избежать путаницы между понятиями «м трубы» и «м трубопровода».

При внесении изменений в ЦИМ автоматически происходит корректировка СД — это поможет решить проблему несогласованности с проектной документацией.

Замечания к прилагаемым документам:

- отсутствуют письмо от заказчика с указанием расстояния вывоза строительного мусора и перевозки материалов, транспортные схемы;

- включение в сводный сметный расчет лимитированных затрат, не согласованных заказчиком (необходимо указывать в задании на проектировании или техническом задании);

- отсутствует письмо от заказчика на включение или отсутствие затрат на строительный контроль, непредвиденные расходы;

- не предоставляются исходные данные заказчика для разработки СД;

- отсутствует справка с описанием изменений, внесенных в ПД, представленную на повторную экспертизу, в которой описываются внесенные изменения в проектную документацию и (или) результаты инженерных изысканий.

Создание среды общих данных (СОД) позволяет решить проблемы с отсутствием документов, обосновывающих сметные расчеты.

Вышеуказанный перечень говорит о невысоком качестве СД, предоставляемой на экспертизу, и актуальности задачи повышения его уровня.

Очень часто основным фактором, влияющим на низкое качество СД, выступают большое количество нормативных стандартов, которые необходимо соблюдать, а также неоднозначность и противоречивость в их трактовке со стороны как проектных организаций, так и представителей государственной экспертизы.

Предоставление СД в форме ЦИМ для экспертизы приведет к:

- сокращению сроков, т.е. позволит оперативно проводить экспертизу и согласовывать изменения, вносимые в ПД объекта;

- оптимизации стоимости путем исключения коллизий;

- улучшению визуализации, которая облегчит специалистам оценку взаимосвязи инженерных, планировочных и прочих технических решений;

- появлению возможности отображения хода работ во времени;

- упрощению аналитики, таким образом интеграция данных позволит в один клик получить доступ к основным документам в проекте, связанным с конкретным техническим решением;

- обнаружению проблем на ранних стадиях и принятию мер по их устранению.

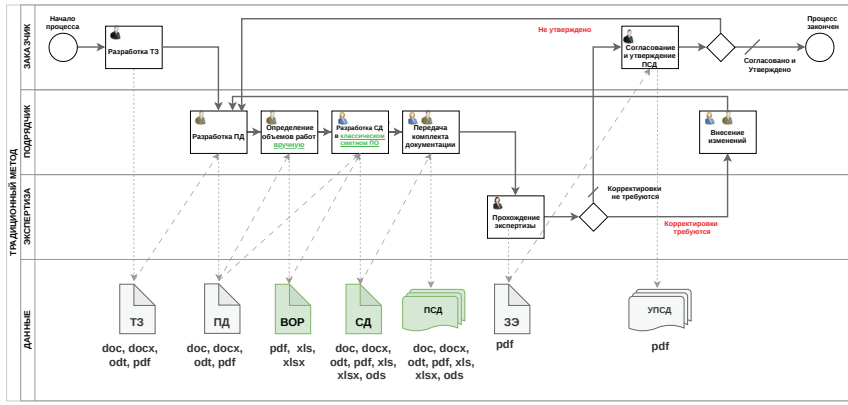
На основании вышеизложенного можно сделать вывод о возможности повышения качества СД за счет проверки и оценки ИМ строительных объектов на основе единой методологической базы, устанавливающей правила формирования сметной документации в форме ЦИМ (с учетом текущих возможностей ПО). Эти правила исключают проблемы разной интерпретации, представленных данных в ИМ (т.е. их состав, объем, уровень детализации), между проектными организациями, ведущими разработку СД в форме информационной модели, и экспертными органами, осуществляющими проверку и оценку.

Анализ процесса получения сметной документации без использования ГИМ

Без использования технологий информационного моделирования этап проектирования носит традиционный характер. При традиционном проектировании работа специалиста по формированию СД подразумевает анализ ПД в виде текстовой и графической информации (показанной в формате двухмерных чертежей и схем), представленной в виде сканированных копий или электронного челонокочитаемого текста.

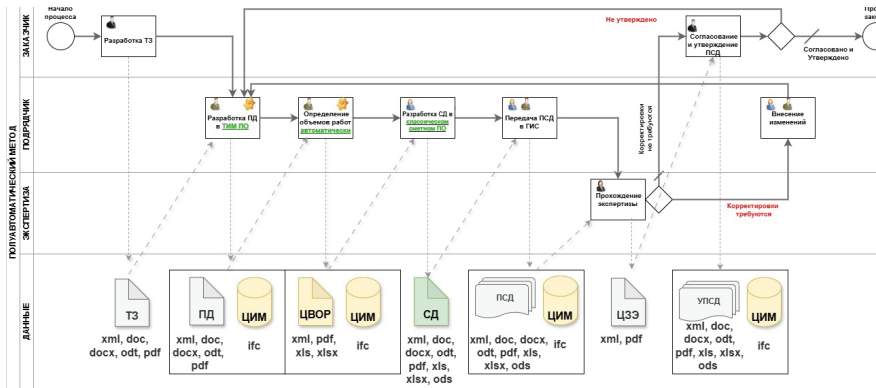
Визуализация традиционного метода проектирования представлена на рис. 1.

В рамках традиционного подхода к проектированию нередко обнаруживаются противоречия как между различными разделами ПД, так и внутри отдельных разделов, проявляющиеся в расхождениях между гра-



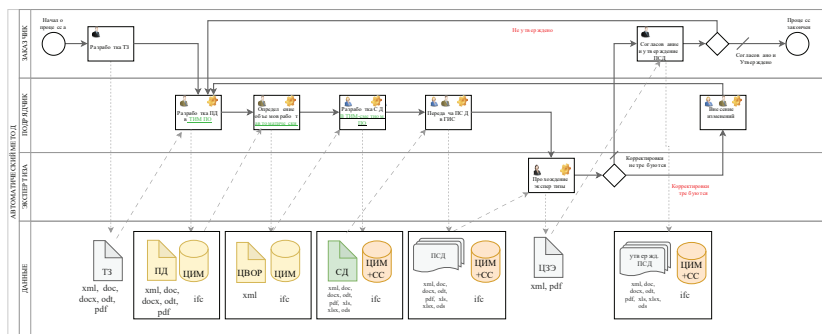
Условные обозначения:
 ТЗ - Техническое задание ПСД - проектно-сметная документация
 ПД - Проектная документация ЗЭ - Заключение экспертизы
 ВОР - Ведомость объемов работ УПСД - утвержденная проектно-сметная документация
 СД - Сметная документация

a



Условные обозначения:
 ТЗ - Техническое задание ПСД - проектно-сметная документация
 ПД - Проектная документация ЦЗЭ - Цифровое заключение экспертизы
 ЦВОР - Цифровая ведомость объемов работ УПСД - утвержденная проектно-сметная документация
 СД - Сметная документация ЦИМ - цифровая информационная модель

b



Условные обозначения:
 ТЗ - Техническое задание ПСД - проект-сметная документация ЦИМ+СС - цифровая информационная модель, включающая сметную документацию
 ПД - Проектная документация ЦЗЭ - Цифровое заключение экспертизы
 ЦВОР - Цифровая ведомость объемов работ УПСД - утвержденная проектно-сметная документация
 СД - Сметная документация ЦИМ - цифровая информационная модель

c

Рис. 1. Процесс получения сметной документации: а — без использования технологий информационного моделирования; б — при использовании технологий информационного моделирования (полуавтоматизированный подход); с — при использовании технологий информационного моделирования (автоматизированный подход)

Fig. 1. Process of preparing cost estimate documentation: a — without the use of building information modelling technologies; b — using building information modelling technologies (semi-automated approach); c — using building information modelling technologies (automated approach)

фическими и текстовыми компонентами. Типичными примерами являются несоответствия между чертежами и сопутствующими спецификациями или ведомостями объемов работ. Кроме того, не исключены случаи, когда информация об идентичной конструктивной единице представлена противоречиво на различных листах одного и того же проектного комплекта.

Зачастую происходит утрата информации об изменениях в ПД, что может нарушить ее целостность и привести к несогласованности между разделами.

Так же при традиционном проектировании нарушается прямая связь между получением объемов работ из проектного отдела в сметный отдел. ВОР могут содержать как арифметические, так и логические ошибки.

В основном подобные ошибки возникают по следующим причинам:

- человеческий фактор;
- большой массив информации, который анализируют и систематизируют специалисты проектных отделов.

После поступления комплекта утвержденной ПД в сметный отдел специалисты в ручном режиме формируют СД в сметном ПК. На данном этапе тоже возникает вероятность возникновения таких ошибок, как:

- неточное определение объемов работ: специалист сметного отдела работает с неполной или устаревшей ПД, особенно это касается скрытых работ;
- использование устаревших расценок: справочники цен регулярно обновляются, но не все специалисты сметного отдела следят за изменениями;
- неправильное использование коэффициентов: региональные, сезонные и другие поправочные коэффициенты имеют четкие условия применения, но их часто используют автоматически, не разбираясь в специфике конкретного проекта;
- отсутствие обязательных реквизитов: каждая позиция должна содержать полный набор данных — шифр работы, корректное наименование, правильную единицу измерения;
- игнорирование региональных особенностей: транспортные расходы, климатические условия, местные нормы и традиции строительства — все это влияет на итоговую цену;
- упущение сезонных факторов: зимние работы требуют дополнительных затрат на обогрев, защиту от осадков, использование специальных материалов;
- пренебрежение дополнительными затратами: специалисты сметного отдела иногда не включают дополнительные затраты, такие как транспортировка материалов, налоги и сборы, резерв на непредвиденные расходы.

В результате формирование СД превращается в весьма трудоемкий процесс и часто сопровождается приумножением уже допущенных при проектировании ошибок.

Погрешности в проекте создают проблемы при формировании смет, увеличивая сроки их составления из-за необходимости исправления выявленных ошибок. А при несвоевременном выявлении этих недочетов при формировании СД увеличивается время прохождения экспертизы. В самом худшем случае финансовое бремя ложится на заказчика и подрядчика. Ошибки в сметах могут привести к значительным финансовым потерям, задержкам в строительстве и даже к юридическим спорам.

Анализ процесса получения сметной документации при использовании ТИМ

Для формирования СД специалистам сметного отдела необходимо знать множество характеристик: объемы и размеры элементов, материалы, марки, расположение конструктивных элементов и т.д. Корректный и систематизированный сбор информации — путь к повышению качества и достоверности СД. Такой сбор способна обеспечить цифровая информационная модель ОКС. Использование ЦИМ значительно повышает эффективность работы специалистов проектного и сметного отделов.

В случае применения ТИМ возможны два подхода к процессу формирования сметной документации из ЦИМ.

Первый подход заключается в полуавтоматизации рабочих процессов специалистов сметного отдела. Визуализация полуавтоматического метода проектирования представлена на рис. 1, б.

Суть данного подхода заключается в том, что вся информация от проектного отдела в сметный отдел передается в виде ЦИМ через среду общих данных, из которой можно получить спецификацию или ведомость объемов работ. При применении специалистами проектного отдела технологий информационного моделирования ВОР и спецификация оборудования, и материалов (СО) формируются автоматически с помощью встроенных в ПО инструментов с минимальным вмешательством человека. При внесении изменений в информационную модель автоматически обновляются данные в ВОР и СО, соответственно сокращается срок отработки изменений, вносимых в ПД. За счет параметризации (взаимосвязи всех проектных решений между собой на основе параметров и свойств) изменение какого-то проектного решения влечет за собой автоматическое изменение другого решения. В итоге ЦИМ формируется из конечного, поддающегося учету множества архитектурно-конструктивных элементов, классифицированных по их видам.

В данном случае процесс формирования СД остается классическим. Используя данные из ЦИМ и автоматизированный расчет объемов работ, специалист сметного отдела определяет технологию производства и назначает соответствующую расценку из сметно-нормативной базы.

При переходе на информационные технологии специалист сметного отдела сокращает сроки производства СД за счет ухода от работы с чертежами и подсчета объемов работ вручную.

Другой подход представляет собой полную автоматизацию процесса получения СД из ЦИМ. Визуализация автоматического метода проектирования приведена на рис. 1, с.

В этом случае происходит интегрированное взаимодействие между ПО проектного и сметного отделов через программы-переходники (сметные ТИМ-модули).

Сметный ТИМ-модуль способен обеспечить:

- автоматическое назначение сметных свойств элементам ЦИМ;
- создание сметной структуры элементов;
- автоматическое обновление данных и контроль вносимых изменений в ЦИМ;
- визуализацию осмечиваемых элементов;
- передачу информации из модели в любое ПО сметного отдела;
- передачу в ЦИМ результатов расчета сметной стоимости, детализированной до уровня элементов ЦИМ;
- сохранение связи между сметным расчетом и ЦИМ;
- автономную работу — рабочие места специалистов проектного и сметного отделов могут быть разделены.

Использование ЦИМ как инструмента для получения СД решает следующие задачи:

- 1) анализ стоимости и эффективности проектных решений в зависимости от уровня детализации информации в проекте и оперативное управление изменениями;
- 2) получение актуальных стоимостных параметров в зависимости от проектных решений на всех уровнях проработки ЦИМ на различных этапах ЖЦ ОКС;
- 3) возможность отслеживания изменений в проектной документации в автоматизированном режиме;
- 4) создание среды общих данных для работы с информационной моделью и ее стоимостными параметрами;
- 5) понижение рисков человеческого фактора при разработке сметной документации;
- 6) снижение временных затрат при оценке стоимости проекта как в целом, так и в разрезе, на различных уровнях проработки;
- 7) объединение затрат в комплексы для формирования сметы контракта и определения начальной максимальной цены контракта (НМЦК);
- 8) гибкость при выборе и оценке проектных решений, ориентируясь на их стоимостные характеристики;
- 9) планирование затрат на основе календарно-сетевых графиков.

Анализ программного обеспечения по получению сметной документации из ЦИМ

Минстрой России активно мотивирует внедрение технологий информационного моделирования в строительстве через законодательство, рекомендации по программному обеспечению, программы обучения и меры поддержки.

На официальном сайте Минстроя России можно ознакомиться с обзором российского ПО для строительной отрасли. Существует несколько отечественных программ, позволяющих эффективно использовать информацию на основе ТИМ при составлении смет (ТИМ-сметное ПО). Рассмотрим несколько таких ПК.

1. Программный комплекс «Адепт: ВІМ».

ООО «Группа компаний «Адепт» — российский производитель программного обеспечения для гражданского и промышленного строительства, компания основана в 2003 г.

Модуль «Адепт: ВІМ» предназначен для формирования спецификаций ТИМ с последующей 3D-визуализацией модели объекта. С помощью этого модуля возможно передавать информацию из трехмерных моделей, сделанных в САПР-системах, в цепочку ТИМ: создавать на основании спецификации смету, далее из сметы формировать календарный план, а из него импортировать информацию в исполнительную документацию.

2. Программный комплекс «1С:Смета ТИМ КОРП».

Разработчик: «1С» — российская компания, основанная в 1991 г.

Программный комплекс «1С:Смета ТИМ КОРП» — комплексное отраслевое решение, предназначенное для автоматизации процесса обработки готовых ЦИМ, сравнения версий, сбора проектной информации и составления ВОР, определения сметной стоимости строительства, выпуска и формирования СД для заключения контрактов на выполненные работы.

3. Программный комплекс «ВІМ-смета АВС».

ООО НПП «АВС-Н» — общество с ограниченной ответственностью, занимающееся разработкой компьютерного программного обеспечения с 1999 г.

«ВІМ-смета АВС» — российский ПК для автоматизации сметно-ресурсного документооборота на всех этапах строительства и проектирования. Система охватывает формирование смет, учет ресурсов, календарно-сетевое планирование и ТИМ-интеграцию.

Компания АВС-Н проводит интеграцию с известными ВІМ-платформами. Интеграция осуществляется посредством плагина АВС. Плагин каждой ВІМ-системы адаптирован под ее интерфейс и особенности.

4. Программный комплекс ВІМ WIZARD.

АО «ВИЗАРДСОФТ» занимается разработкой ПО для строительства с 1993 г.

BIM WIZARD — ТИМ-сметное ПО. Данное решение предназначено для автоматизированного получения строительных объемов из систем автоматизированного проектирования с дальнейшим составлением СД на их основе. Также ПО реализует технологию информационного моделирования и выгрузку ВОР в формате XML по схеме Главгосэкспертизы, поддерживает бесшовную передачу данных между сметой и моделью, предоставляет возможность в дальнейшем проводить экспертизу смет в связке с проектом.

5. Программный комплекс «5D Смета».

Разработчик: ООО НТЦ «Гектор» — российская компания, основанная в 1989 г.

5D Смета — программный продукт для интеграции сметной информации в ТИМ-проекты и передачи стоимостных показателей в системы календарного планирования.

Программа позволяет автоматизировать расчет объемов работ и стоимости по каждому элементу ЦИМ, обеспечивая ускорение и высокую точность составления смет.

Поддержка формата Industry Foundation Classes (IFC) обеспечивает загрузку исходных данных для разработки смет из различных систем проектирования, а благодаря поддержке формата АРПС 5D Смета дает возможность использовать любую сметную программу для расчета стоимости проектируемых объектов.

6. Программный комплекс Smeta.ru BIM.

Группа компаний «СтройСофт» занимается разработкой программ для составления смет с 1995 г.

Два разработчика сметного ПО — ГК «СтройСофт» и ООО НПП «АВС-Н» выпустили совместное решение — Smeta.ru BIM: полный набор ПО, необходимый для разработки сметной документации как классическим способом, так и с применением BIM/ТИМ.

Smeta.ru BIM представляет собой единый набор программных модулей, сочетающий в себе классическое рабочее место сметчика с интерфейсом и возможностями программы Smeta.ru и компонентов, позволяющих осуществлять назначение сметных норм и расценок на элементы 3D-моделей, созданных в самых распространенных программах для проектирования. Решение может применяться как крупными строительными компаниями, так и небольшими подрядными организациями.

Анализ функциональных различий ТИМ-сметного ПО представлен на рис. 2.

Функциональные возможности большинства ТИМ-сметных ПК включают: импорт данных из систем автоматизированного проектирования (Renga, Revit, nanoCAD и др.); загрузку моделей в формате IFC; автоматизированное формирование ведомостей объемов работ; привязку сметных норм и ресурсов к элементам цифровой модели; формирование локальных и объектных сметных расчетов; визуализацию элементов модели, участвующих в расчетах; контроль изменений в проектной документации.

Использование указанных инструментов позволяет автоматизировать отдельные этапы формирования СД и сократить трудоемкость определения объемов работ. В частности, ПК обеспечивают из-

Функционал Functionality						
Проведение конъюнктурного анализа цен на материалы, оборудование и прочих затрат Conducting market price analysis for materials, equipment, and other costs						
Создание и управление ИМ зданий, интеграция всех этапов ЖЦ ОКС Creation and management of building information models, integration of all stages of the construction project lifecycle						
Загрузка данных из среды общих данных Pilot-BIM Loading data from the Pilot-BIM common data environment						
Привязка сметных показателей к задачам Timeliner Navisworks с распределением финансовых ресурсов Linking estimate indicators to Navisworks Timeliner tasks with financial resource allocation						
Подготовка комплекта проектно-сметной документации внутри системы Preparation of a full set of design and estimate documentation within the system						
Выпуск печатных форм документов Generation of printed document forms						
Бесшовная передача данных из ЦИМ в стороннее сметное ПО Seamless data transfer from the digital information model to third-party estimating software						

Рис. 2. Анализ функциональных различий ТИМ-сметного ПО

Fig. 2. Analysis of functional differences in BIM-based cost estimation software

влечение количественных характеристик элементов из информационной модели и формирование ведомостей объемов работ на их основе. Однако проведенный анализ показывает, что существующие программные решения не обеспечивают полной реализации автоматического метода формирования СД из цифровой информационной модели. Основные ограничения связаны как с особенностями структуры цифровых моделей, так и с ограничениями используемых механизмов сопоставления элементов модели и сметных нормативов.

Одним из ключевых ограничений является отсутствие единых правил структурирования и параметризации информации в ЦИМ для целей сметного нормирования. В большинстве случаев элементы модели не содержат полного набора параметров, необходимых для автоматического назначения сметных норм. В связи с этим сопоставление элементов модели и сметных нормативов осуществляется на основе шаблонов или правил сопоставления, требующих участия специалиста-сметчика. Таким образом, фактически реализуется полуавтоматический подход к формированию сметной документации.

Дополнительные ограничения связаны с различиями в структуре информационных моделей, формируемых в различных системах автоматизированного проектирования. Модели могут содержать различную степень детализации элементов, различную структуру параметров и различный набор атрибутивных данных, что затрудняет разработку универсальных механизмов автоматического сопоставления элементов модели и сметных нормативов.

Отдельная проблема — ограниченность форматов обмена сведениями между информационной моделью и сметными ПК. В практике государственной экспертизы используются специализированные форматы передачи СД, в частности формат GGE XML, применяемый для представления сметных расчетов в информационных системах государственной экспертизы, а также формат АРПС, используемый для обмена сметной информацией между программными комплексами.

Несмотря на широкое распространение указанных форматов, они ориентированы преимущественно на передачу табличных данных сметных расчетов и не обеспечивают сохранение семантических связей между элементами ЦИМ и соответствующими сметными позициями. При экспорте сметной документации из ТИМ-сметных систем в указанные форматы передаются итоговые сметные показатели, однако информация о том, из каких элементов информационной модели получены соответствующие объемы работ и стоимостные показатели, не сохраняется.

В результате происходит разрыв информационной связи между ЦИМ объекта и сформированной на ее основе сметной документацией. Это существенно ограничивает возможности автоматизиро-

ванной проверки достоверности определения сметной стоимости при проведении государственной экспертизы, поскольку экспертные системы получают лишь итоговые сметные данные без возможности их сопоставления с элементами цифровой модели.

Таким образом, проведенный анализ отечественных ТИМ-сметных ПК показывает, что существующие программные решения обеспечивают автоматизацию отдельных этапов формирования СД на основе ЦИМ, включая извлечение объемов работ, формирование ведомостей объемов работ и привязку сметных норм к элементам модели. Однако сквозная реализация автоматического метода формирования СД из ЦИМ в настоящее время не обеспечивается.

Ограничения существующих программных решений связаны с необходимостью ручной настройки сопоставления элементов модели и сметных нормативов, различиями в структуре параметров цифровых моделей, а также с особенностями используемых форматов обмена данными. В частности, форматы передачи СД, применяемые при взаимодействии ПК и систем государственной экспертизы (GGE XML, АРПС), обеспечивают передачу табличных сметных данных, но не сохраняют семантические связи между элементами ЦИМ и соответствующими сметными позициями.

Выявленные ограничения подтверждают отсутствие единой методологической модели формирования СД из ЦИМ, обеспечивающей сохранение структурных и семантических связей данных при их передаче в системы государственной экспертизы, что обосновывает необходимость дальнейших исследований в этом направлении.

Концептуальная модель формирования сметной документации из ЦИМ

Предлагается структурная модель, состоящая из четырех взаимосвязанных уровней, обеспечивающих формирование СД на основе ЦИМ и сохранение связей между проектной и сметной информацией (рис. 3).

Предлагаемая концептуальная модель формирования СД из ЦИМ включает четыре взаимосвязанных уровня: нормативный, информационный, программный и уровень экспертизы. Нормативный уровень определяет требования к структуре данных, используемых при формировании СД. На информационном уровне формируется ЦИМ ОКС, содержащая параметры элементов, необходимые для определения объемов работ и назначения сметных норм. Программный уровень обеспечивает обработку информации, извлечение объемов работ, сопоставление элементов модели со сметными нормативами и формирование СД. На уровне экспертизы осуществляются проверка достоверности определения сметной стоимости и анализ представленных сметных расчетов. Взаимодействие между уровнями

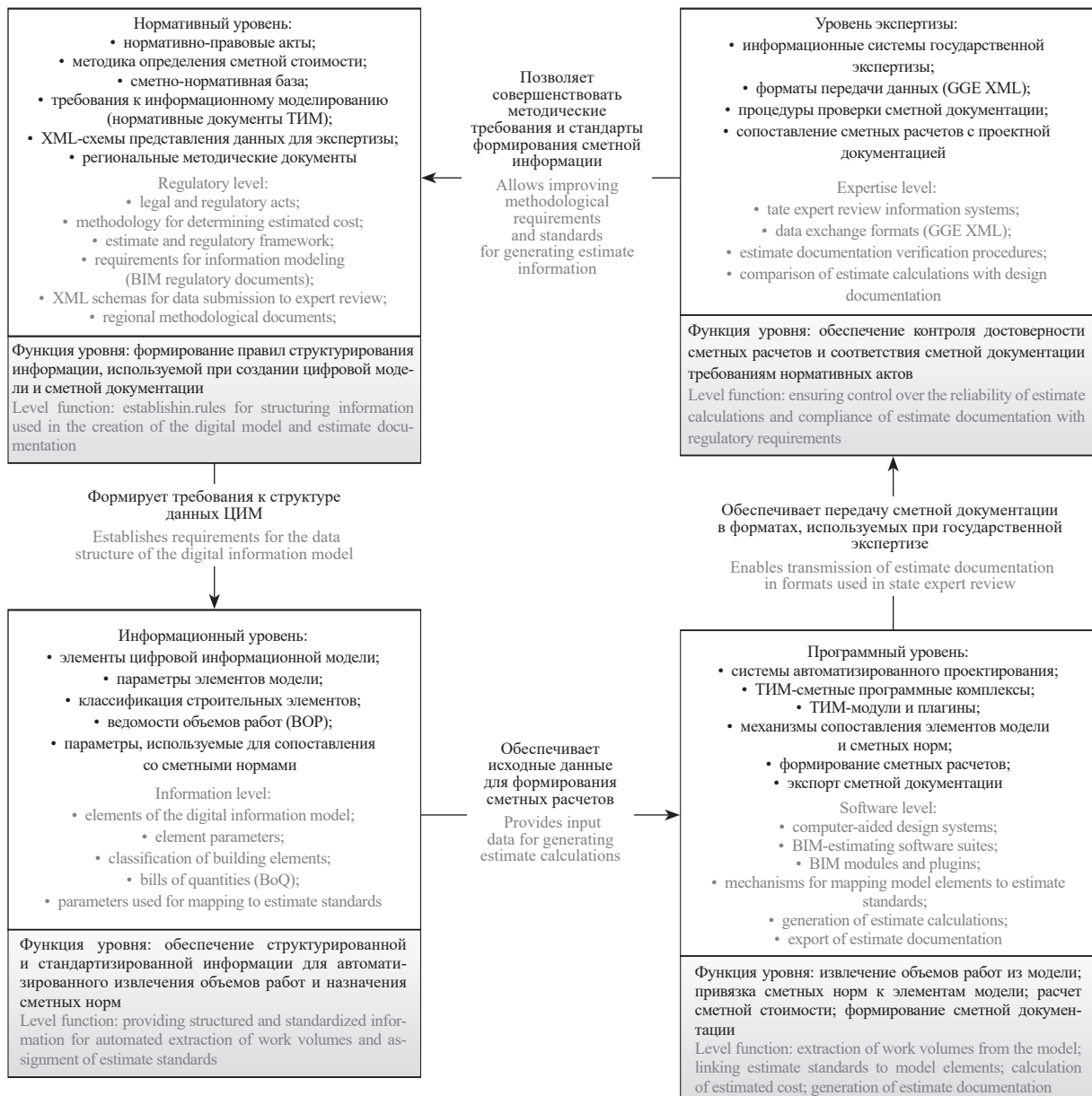


Рис. 3. Концептуальная модель формирования сметной документации из цифровой информационной модели объекта капитального строительства

Fig. 3. Conceptual model for the preparation of cost estimate documentation based on the digital information model of a capital construction project

обеспечивает последовательную трансформацию информации от нормативных требований к формированию СД и ее проверке в системе государственной экспертизы. Обратная связь, формируемая по результатам экспертизы, используется для совершенствования нормативных требований и методических подходов к формированию СД на основе цифровых информационных моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрена проблема формирования СД в условиях применения технологий информационного моделирования в строительстве. Несмотря на активное развитие нормативной базы и расширение практики применения ТИМ, в настоящее время

отсутствует единая методологическая модель формирования СД на основе ЦИМ ОКС, учитывающая требования нормативного регулирования, структуру сметно-нормативной базы и возможности существующего ПО.

Проведенный анализ замечаний органов государственной экспертизы в части проверки достоверности определения сметной стоимости показал, что значительная часть выявляемых несоответствий связана с нарушением согласованности между проектной и сметной информацией, отсутствием корректных расчетов объемов работ, а также несоответствием представленных данных требованиям нормативных документов. Выявленные замечания свидетельствуют о наличии системных проблем

в процессе формирования СД, обусловленных разрывом информационных связей между ПД, сметными расчетами и используемыми форматами передачи сведений.

Анализ процессов формирования СД в традиционном и ТИМ-ориентированном подходах показал, что применение ЦИМ позволяет существенно повысить точность определения объемов работ и снизить влияние человеческого фактора. Однако существующие программные решения обеспечивают автоматизацию лишь отдельных этапов формирования СД и не реализуют в полной мере автоматический метод ее формирования из цифровой информационной модели.

Проведенный анализ отечественных ТИМ-сметных ПК показал, что основными ограничениями существующих решений являются отсутствие единых принципов структурирования данных информационной модели для целей сметного нормирования, необходимость ручного сопоставления элементов модели и сметных нормативов, а также ограниченность используемых форматов обмена данными. В частности, форматы передачи СД, применяемые при взаимодействии ПК и систем государственной экспертизы (GGE XML, АРПС), обеспечивают передачу табличных сметных данных, но не сохраняют семантические связи между элементами ЦИМ и соответствующими сметными позициями.

Полученные результаты подтверждают необходимость разработки методологических принципов формирования СД из ЦИМ, обеспечивающих согласованность нормативных требований, структуры информационных моделей и функциональных возможностей программных средств. В рамках исследова-

ования предложена концептуальная модель формирования СД из ЦИМ, включающая нормативный, информационный, программный уровни и уровень экспертизы. Предложенная модель позволяет систематизировать процессы формирования СД и определить ключевые информационные связи между элементами цифровой модели и сметными расчетами.

Научный вклад исследования заключается в систематизации проблем формирования СД при использовании ТИМ, выявлении ограничений существующих программных решений и форматов обмена данными, а также в обосновании необходимости разработки методологической модели формирования СД из ЦИМ для целей государственной экспертизы.

Следует отметить, что проведенное исследование имеет ряд ограничений. В частности, анализ ПО был выполнен на основе функциональных характеристик существующих ТИМ-сметных программных комплексов без проведения экспериментальной апробации предложенной модели на конкретных проектах. Кроме того, в рамках исследования не рассматривались вопросы экономической эффективности внедрения ТИМ-сметных решений и их влияния на сроки подготовки проектной документации. Дальнейшие исследования в этом направлении могут быть связаны с разработкой детализированной методологической модели формирования СД из ЦИМ, включая разработку требований к структуре параметров элементов информационной модели, методам сопоставления элементов модели и сметных нормативов, а также совершенствование форматов обмена данными между информационными моделями, сметными программными комплексами и системами государственной экспертизы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Fazeli A., Dashti M., Jalaee F., Khanzadi M.* An integrated BIM-based approach for cost estimation in construction projects // *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2021. Vol. 28. Issue 9. Pp. 2828–2854. DOI: 10.1108/ecam-01-2020-0027. EDNCLKLQS.

2. *Rouhanizadeh B., Kermanshachi S., Ramaji I., Shakerian S.* Development of an automated tool for cost estimation of transportation projects // *International Conference on Transportation and Development* 2021. 2021. Pp. 178–190. DOI: 10.1061/9780784483541.017

3. *Le H.T.T., Likhitrungsilp V., Yabuki N.* A BIM-database-integrated system for construction cost estimation // *ASEAN Engineering Journal*. 2021. Vol. 11. Issue 1. Pp. 45–59. DOI: 10.11113/aej.v11.16666.EDNZWTKTC.

4. *Liu H., Lu M., Al-Hussein M.* BIM-based integrated framework for detailed cost estimation

and schedule planning of construction projects // *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC)*. 2014. DOI: 10.22260/isarc2014/0038

5. *Ma Z., Wei Z., Zhang X.* Semi-automatic and specification-compliant cost estimation for tendering of building projects based on IFC data of design model // *Automation in Construction*. 2013. Vol. 30. Pp. 126–135. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.11.020

6. *Gökçe K.U., Gökçe H.U., Katranuschkov P.* IFC-based product catalog formalization for software interoperability in the construction management domain // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2013. Vol. 27. Issue 1. Pp. 36–50. DOI: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000194

7. *Alzraiee H.* Cost estimate system using structured query language in BIM // *International Journal*

of Construction Management. 2022. Vol. 22. Issue 14. Pp. 2731–2743. DOI: 10.1080/15623599.2020.1823061

8. *Agostinelli S., Cinquepalmi F., Ruperto F.* 5D BIM: tools and methods for digital project construction management // *WIT Transactions on the Built Environment*. 2019. Vol. 1. Pp. 205–215. DOI: 10.2495/WIT190181

9. *Stransky M., Dlask P.* Process of matching work items between BIM model and cost estimating software // *Engineering for Rural Development*. 2018. DOI: 10.22616/erdev2018.17.n423

10. *Akanbi T., Zhang J.* Automated wood construction cost estimation // *Computing in Civil Engineering* 2017. 2017. Pp. 141–148. DOI: 10.1061/9780784480823.018

11. *Nabavi A., Ramaji I., Sadeghi N., Anderson A.* Leveraging natural language processing for automated information inquiry from building information models // *Journal of Information Technology in Construction*. 2023. Vol. 28. Pp. 266–285. DOI: 10.36680/j.itcon.2023.013. EDN JBZMWH.

12. *Shahinmoghadam M., Kahou S.E., Motamedi A.* Neural semantic tagging for natural language-based search in building information models: implications for practice // *Computers in Industry*. 2024. Vol. 155. P. 104063. DOI: 10.1016/j.compind.2023.104063. EDN MUUTY.

13. *Yin M., Tang L., Webster Ch., Xu Sh., Li X., Ying H.* An ontology-aided, natural language-based approach for multi-constraint BIM model querying // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 76. P. 107066. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107066. EDN JNESGR.

14. *Lee M., Chai Ch., Xiong Ya., Gui H.* Technology acceptance model for building information modelling based virtual reality (BIM-VR) in cost estimation // *Journal of Information Technology in Construction*. 2022. Vol. 27. Pp. 914–925. DOI: 10.36680/j.itcon.2022.044. EDN PTTQPQ.

15. *Ma Z., Liu Z.* BIM-based intelligent acquisition of construction information for cost estimation of building projects // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 85. Pp. 358–367. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.561

16. *Herdyana H., Suroso A.* The impacts of 5D-building information modeling on construction's time and cost performance // *Sinergi*. 2023. Vol. 27. Issue 3. Pp. 393–404. DOI: 10.22441/sinergi.2023.3.010

17. *Shen Z., Issa R.R.A.* Quantitative evaluation of the BIM-assisted construction detailed cost estimates // *Electronic Journal of Information Technology in Construction*. 2010. Vol. 15. Pp. 234–257. EDN OEJMBT.

18. *Zhang X., Azhar S., Nadeem A., Khalfan M.* Using building information modelling to achieve lean principles by improving efficiency of work teams // *International Journal of Construction Management*. 2018. Vol. 18. Issue 4. Pp. 293–300. DOI: 10.1080/15623599.2017.1382083. EDN YBAUHB.

19. *Khaleel A.M., Naimi S.* Automation of cost control process in construction project building information modeling (BIM) // *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*. 2022. Vol. 10. Issue 6. P. 28. DOI: 10.21533/pen.v10i6.3354. EDN GANELW.

20. *Liu H., Cheng J.C.P., Gan V.J.L.* Developing a knowledge-based system for semantic enrichment and automatic BIM-based quantity take-off // *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. 2021. DOI: 10.22260/ISARC2021/0025

21. *Yang S.W., Moon S.W., Jang H., Choo S., Kim S.A.* Parametric Method and Building Information Modeling-Based Cost Estimation Model for Construction Cost Prediction in Architectural Planning // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Issue 19. P. 9553. DOI: 10.3390/app12199553. EDN CKKTVK.

22. *Sattineni A., Macdonald J.A.* 5D BIM: A Case Study of an Implementation Strategy in the Construction Industry // *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC)*. 2014. DOI: 10.22260/isarc2014/0048

23. *Aibinu A., Venkatesh S.* Status of BIM adoption and the BIM experience of cost consultants in Australia // *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*. 2014. Vol. 140. Issue 3. DOI: 10.1061/(asce)ei.1943-5541.0000193

24. *Khosakitchalert C., Yabuki N., Fukuda T.* The Accuracy Enhancement of Architectural Walls Quantity Takeoff for Schematic BIM Models // *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC)*. 2018. DOI: 10.22260/ISARC2018/0108

25. *Lee S., Kim K., Yu Ju.* Ontological inference of work item based on BIM data // *KSCSE Journal of Civil Engineering*. 2015. Vol. 19. Issue 3. Pp. 538–549. DOI: 10.1007/S12205-013-0739-5. EDN UOGRQB.

26. *Chen Sh., Zeng Yu., Majdi A., Salameh A.A., Alkhalifah T., Alturise F. et al.* Potential features of building information modelling for application of project management knowledge areas as advances modeling tools // *Advances in Engineering Software*. 2023. Vol. 176. P. 103372. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2022.103372. EDN XQYKBR.

27. *Wan Abdul Basir W.N.F., Ujang U., Majid Z.* Adaptation 4D and 5D BIM for BIM/GIS data integration in construction project management // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1274. Issue 1. DOI: 10.1088/1755-1315/1274/1/012002. EDN GVAIFG.

28. *Соколова В.В., Шершнева Д.Д.* Анализ средств автоматизации расчета объемов работ для сметных расчетов с использованием информационного моделирования на базе Revit – 5D смета // *Ползуновский альманах*. 2022. № 1. С. 177–180. EDN JZLQNU.

29. Смирнова Н.А., Судариков В.В., Шейкин А.А. Классификация данных цифровой информационной модели, выпуск ведомостей объемов работ и смет в системе «1С:СМЕТА ТИМ КОРП» // Новые информационные технологии в архитектуре и строительстве : мат. VII Междунар. научн.-практ. конф. 2024. С. 88. EDN PSYRWP.

30. Малахова В.В., Замша О.Н. Анализ отечественных программных комплексов оценки стоимости объектов капитального строительства с применением ТИМ технологий // Экономика строительства и природопользования. 2024. № 2 (91). С. 84–93. EDN JWEOQX.

31. Тюрин И.А., Гинзбург А.В. Автоматизация составления сметной документации с применением технологий информационного моделирования // Системотехника строительства. Киберфизические строительные системы – 2019 : сб. мат. Всеросс. науч.-практ. конф. 2019. С. 525–531. EDN ZOXC DJ.

32. Tyurin I.A., Ginzburg A.V. Increasing the economic efficiency of design and construction solutions due to the automated identification of construction works and structural elements of information models // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1083. P. 012076. DOI: 10.1088/1757-899X/1083/1/012076. EDN YWNXQR.

33. Хаймин Д.И. Формирование сметной стоимости объекта капитального строительства с при-

менением цифровой информационной модели // Поколение будущего: взгляд молодых ученых – 2022. 2022. С. 554–556. EDN MNHPKT.

34. Ещенко Е.М., Алешина И.А. Информационное моделирование в сметном деле: BIM-технологии // Цифровой регион: опыт, компетенции, проекты : сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию Брянского государственного инженерно-технологического университета. 2020. С. 292–295. EDN FATY LX.

35. Игнатъев А.В., Боркунов В.А., Рябова Е.А., Панов А.В., Иванов В.В., Адамия Д.Д. Разработка методики формирования сметы строительного объекта на основе его информационной модели // Инженерный вестник Дона. 2021. № 12 (84). С. 488–495. EDN EHJLP.

36. Жданова Е.А. Формирование сметной стоимости объекта капитального строительства с применением цифровой информационной модели // Молодежь и системная модернизация страны : сб. науч. ст. 7-й Междунар. науч. конф. студентов и молодых ученых. 2022. С. 158–160. EDN AQMKKE.

37. Макиша Е.В. Формирование сметной документации на основе цифровой информационной модели // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 5. С. 764–776. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.764-776. EDN NSOGKF.

Поступила в редакцию 19 марта 2026 г.

Принята в доработанном виде 30 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 28 апреля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: Елена Владиславовна Кац — кандидат технических наук, доцент, кафедра информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3218-4786, ORCID: 0000-0003-1907-634X; KatsEV@mgsu.ru;

Нина Евгеньевна Смелницкая — инженер-сметчик, производственно-технический отдел водоснабжения и водоотведения; **Региональные коммунальные системы;** 143987, Московская область, г. Балашиха, мкр. Железнодорожный, ул. Советская, д. 59; smelnitskaya@bks.ooo.

Вклад авторов:

Кац Е.В. — концепция исследования, формулирование цели и задач, разработка концептуальной модели формирования сметной документации из ЦИМ, интерпретация результатов, написание основного текста статьи, формулирование выводов.

Смелницкая Н.Е. — постановка научной проблемы, анализ нормативно-правовой и методической базы, сбор и систематизация данных по замечаниям государственной экспертизы, участие в разработке структуры исследования, проведение анализа процессов формирования сметной документации и программного обеспечения, участие в интерпретации результатов и редактировании текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Fazeli A., Dashti M., Jalaee F., Khanzadi M. An integrated BIM-based approach for cost estimation in construction projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2021; 28(9):2828-2854. DOI: 10.1108/ecam-01-2020-0027. EDN CLKLQS.

2. Rouhanizadeh B., Kermanshachi S., Ramaji I., Shakerian S. Development of an automated tool for cost estimation of transportation projects. *International Conference on Transportation and Development* 2021. 2021; 178-190. DOI: 10.1061/9780784483541.017

3. Le H.T.T., Likhitruangsilp V., Yabuki N. A BIM-database-integrated system for construction cost estimation. *ASEAN Engineering Journal*. 2021; 11(1):45-59. DOI: 10.11113/aej.v11.16666. EDN ZWTKTC.
4. Liu H., Lu M., Al-Hussein M. BIM-based integrated framework for detailed cost estimation and schedule planning of construction projects. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC)*. 2014. DOI: 10.22260/isarc2014/0038
5. Ma Z., Wei Z., Zhang X. Semi-automatic and specification-compliant cost estimation for tendering of building projects based on IFC data of design model. *Automation in Construction*. 2013; 30:126-135. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.11.020
6. Gökçe K.U., Gökçe H.U., Katranuschkov P. IFC-based product catalog formalization for software interoperability in the construction management domain. *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2013; 27(1):36-50. DOI: 10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000194
7. Alzraiee H. Cost estimate system using structured query language in BIM. *International Journal of Construction Management*. 2022; 22(14):2731-2743. DOI: 10.1080/15623599.2020.1823061
8. Agostinelli S., Cinquepalmi F., Ruperto F. 5D BIM: tools and methods for digital project construction management. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2019; 1:205-215. DOI: 10.2495/BIM190181
9. Stransky M., Dlask P. Process of matching work items between BIM model and cost estimating software. *Engineering for Rural Development*. 2018. DOI: 10.22616/erdev2018.17.n423
10. Akanbi T., Zhang J. Automated wood construction cost estimation. *Computing in Civil Engineering 2017*. 2017; 141-148. DOI: 10.1061/9780784480823.018
11. Nabavi A., Ramaji I., Sadeghi N., Anderson A. Leveraging natural language processing for automated information inquiry from building information models. *Journal of Information Technology in Construction*. 2023; 28:266-285. DOI: 10.36680/j.itcon.2023.013. EDN JBZMWH.
12. Shahinmoghdam M., Kahou S.E., Motamedi A. Neural semantic tagging for natural language-based search in building information models: implications for practice. *Computers in Industry*. 2024; 155:104063. DOI: 10.1016/j.compind.2023.104063. EDN MUUTYI.
13. Yin M., Tang L., Webster Ch., Xu Sh., Li X., Ying H. An ontology-aided, natural language-based approach for multi-constraint BIM model querying. *Journal of Building Engineering*. 2023; 76:107066. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107066. EDN JNESGR.
14. Lee M., Chai Ch., Xiong Ya., Gui H. Technology acceptance model for building information modeling based virtual reality (BIM-VR) in cost estimation. *Journal of Information Technology in Construction*. 2022; 27:914-925. DOI: 10.36680/j.itcon.2022.044. EDN PTTQPQ.
15. Ma Z., Liu Z. BIM-based intelligent acquisition of construction information for cost estimation of building projects. *Procedia Engineering*. 2014; 85:358-367. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.561
16. Herdyana H., Suroso A. The impacts of 5D-building information modeling on construction's time and cost performance. *Sinergi*. 2023; 27(3):393-404. DOI: 10.22441/sinergi.2023.3.010
17. Shen Z., Issa R.R.A. Quantitative evaluation of the BIM-assisted construction detailed cost estimates. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*. 2010; 15:234-257. EDN OEJMBT.
18. Zhang X., Azhar S., Nadeem A., Khalfan M. Using building information modelling to achieve lean principles by improving efficiency of work teams. *International Journal of Construction Management*. 2018; 18(4):293-300. DOI: 10.1080/15623599.2017.1382083. EDN YBAUHB.
19. Khaleel A.M., Naimi S. Automation of cost control process in construction project building information modeling (BIM). *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*. 2022; 10(6):28. DOI: 10.21533/pen.v10i6.3354. EDN GANELW.
20. Liu H., Cheng J.C.P., Gan V.J.L. Developing a knowledge-based system for semantic enrichment and automatic BIM-based quantity take-off. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. 2021. DOI: 10.22260/ISARC2021/0025
21. Yang S.W., Moon S.W., Jang H., Choo S., Kim S.A. Parametric Method and Building Information Modeling-Based Cost Estimation Model for Construction Cost Prediction in Architectural Planning. *Applied Sciences*. 2022; 12(19):9553. DOI: 10.3390/app12199553. EDN CKKTVK.
22. Sattineni A., Macdonald J.A. 5D BIM: A Case Study of an Implementation Strategy in the Construction Industry. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC)*. 2014. DOI: 10.22260/isarc2014/0048
23. Aibinu A., Venkatesh S. Status of BIM adoption and the BIM experience of cost consultants in Australia. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*. 2014; 140(3). DOI: 10.1061/(asce)ei.1943-5541.0000193
24. Khosakitchalert C., Yabuki N., Fukuda T. The Accuracy Enhancement of Architectural Walls Quantity Takeoff for Schematic BIM Models. *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC)*. 2018. DOI: 10.22260/ISARC2018/0108
25. Lee S., Kim K., Yu Ju. Ontological inference of work item based on BIM data. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2015; 19(3):538-549. DOI: 10.1007/S12205-013-0739-5. EDN UOGRQB.
26. Chen Sh., Zeng Yu., Majdi A., Salameh A.A., Alkhalifah T., Alturise F. et al. Potential features

of building information modelling for application of project management knowledge areas as advances modeling tools. *Advances in Engineering Software*. 2023; 176:103372. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2022.103372. EDN XQYKBR.

27. Wan Abdul Basir W.N.F., Ujang U., Majid Z. Adaptation 4D and 5D BIM for BIM/GIS data integration in construction project management. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023; 1274(1). DOI: 10.1088/1755-1315/1274/1/012002. EDN GVAIFG.

28. Sokolova V.V., Shershneva D.D. Analysis of automation tools for calculating work volumes for estimate calculations using information modeling based on Revit – 5D estimate. *Polzunovsky Almanac*. 2022; 1:177-180. EDN JZLQNU. (rus.).

29. Smirnova N.A., Sudarikov V.V., Sheykin A.A. Classification of digital information model data and generation of bills of quantities and estimates in the “1C:SMETA TIM KORP” system. *New Information Technologies in Architecture and Construction: Proceedings of the VII International Scientific Conference*. 2024; 88. EDN PSYRWP. (rus.).

30. Malakhova V.V., Zamsha O.N. Analysis of domestic software complexes for assessing the cost of capital construction objects using TIM technologies. *Economics of Construction and Environmental Management*. 2024; 2(91):84-93. EDN JWEOQX. (rus.).

31. Tyurin I.A., Ginzburg A.V. Automation of estimate documentation development using information modeling technologies. *Systems Engineering of Construction. Cyber-Physical Construction Systems – 2019 : Proceedings of the All-Russian Scientific Conference*. 2019; 525-531. EDN ZOXC DJ. (rus.).

32. Tyurin I.A., Ginzburg A.V. Increasing the economic efficiency of design and construction solutions

due to the automated identification of construction works and structural elements of information models. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 1083:012076. DOI: 10.1088/1757-899X/1083/1/012076. EDN YWNXQR.

33. Khaimin D.I. Formation of the estimated cost of a capital construction project using a digital information model. *Generation of the Future: View of Young Scientists – 2022*. 2022; 554-556. EDN MNHPKT. (rus.).

34. Eshchenko E.M., Aleshina I.A. Information modeling in budget planning: BIM technologies. *Digital region: experience, competencies, projects : collection of articles from the III International scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of the Bryansk State University of Engineering and Technology*. 2020; 292-295. EDN FATYLX. (rus.).

35. Ignatyev A.V., Borkunov V.A., Ryabova E.A., Panov A.V., Ivanov V.V., Adamiya D.D. Development of a methodology for the formation of an estimate for a construction object based on its information model. *Engineering journal of Don*. 2021; 12(84):488-495. EDN EHIJLP. (rus.).

36. Zhdanova E.A. Formation of the estimated cost of a capital construction project using a digital information model. *Youth and systemic modernization of the country : collection of scientific articles from the 7th International Scientific Conference of Students and Young Scientists*. 2022; 158-160. EDN AQMKKE. (rus.).

37. Makisha E.V. Formation of estimate documentation based on a building information model. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2025; 20(5):764-776. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.764-776. EDN NSOGKF. (rus.).

Received March 19, 2026.

Adopted in revised form on March 30, 2026.

Approved for publication on April 28, 2026.

BiNOTES: **Elena V. Kats** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems, Technologies and Automation in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3218-4786, ORCID: 0000-0003-1907-634X; KatsEV@mgsu.ru;

Nina E. Smelnitskaya — estimating engineer, production and technical department of water supply and sanitation; **Regional utility systems**; 59 Sovetskaya st., mic. Zheleznodorozhny, Balashikha, Moscow region, 143987, Russian Federation; smelnitskaya@bks.ooo.

Author contributions:

Elena V. Kats — research concept, formulation of the aim and objectives, development of the conceptual model for generating cost estimate documentation from digital information models, interpretation of results, writing of the main text of the article, formulation of conclusions.

Nina E. Smelnitskaya — problem statement, analysis of the regulatory and methodological framework, collection and systematization of data on comments from state expertise, participation in developing the research structure, analysis of processes for generating cost estimate documentation and software tools, participation in interpretation of results and editing of the manuscript.

The authors declare no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.057

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.849-862

Организационно-технологическое моделирование модульной сборки атомной электростанции для сокращения инвестиционно-строительного цикла

Асият Бахауовна Моттаева

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование посвящено разработке организационно-технологической модели модульной сборки атомных электростанций, направленной на сокращение инвестиционно-строительного цикла (ИСЦ) при сохранении нормативных требований надежности и безопасности. В условиях высокой капиталоемкости и длительности строительства энергоблоков переход к индустриализированной технологии с высокой степенью заводской готовности предполагает формализацию процессов параллелизации работ, укрупнения модулей и управления транспортно-монтажными рисками. Научная проблема заключается в построении воспроизводимой модели, обеспечивающей количественное сокращение сроков строительства без снижения показателей прочности и устойчивости конструкций.

Материалы и методы. Применены методы календарно-сетевое моделирования, организационно-технологического анализа, структурной оптимизации процессов и расчетной верификации временных состояний конструкций в соответствии с требованиями действующих строительных и отраслевых нормативов. Проведено сопоставление традиционной площадочной технологии и модульной схемы сооружения с учетом стадий заводского изготовления, транспортировки и монтажа укрупненных элементов. Использованы данные типовых проектов энергоблоков поколения III+ и нормативные показатели трудоемкости и продолжительности работ.

Результаты. Разработана формализованная модель оценки влияния степени укрупнения модулей и уровня параллелизации процессов на продолжительность строительства. Установлено, что при коэффициенте укрупнения 0,6–0,75 обеспечивается сокращение ИСЦ на 15–30 % при сохранении нормативных требований прочности, устойчивости и сейсмостойкости. Определена структура распределения транспортно-монтажных рисков в общей системе проектных рисков.

Выводы. Предложенная организационно-технологическая модель обеспечивает количественно подтвержденное сокращение сроков строительства энергоблоков без компромиссов по безопасности и надежности. Методика носит воспроизводимый характер и может применяться при серийном сооружении энергоблоков различной мощности, включая проекты малых модульных реакторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: атомная электростанция, модульная сборка, организационно-технологическое моделирование, инвестиционно-строительный цикл, параллелизация процессов, укрупнение модулей, управление рисками, индустриализация строительства

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Моттаева А.Б. Организационно-технологическое моделирование модульной сборки атомной электростанции для сокращения инвестиционно-строительного цикла // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 5. С. 849–862. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.849-862

Автор, ответственный за переписку: Асият Бахауовна Моттаева, asenka2574@gmail.com.

Organizational and technological modelling of NPP modular assembly for reducing the construction investment cycle

Asiat B. Mottaeva

Financial University under the Government of the Russian Federation; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper is devoted to the development of an organizational and technological model for modular construction of nuclear power plants aimed at reducing the investment and construction cycle while maintaining regulatory requirements for reliability and safety. Under conditions of high capital intensity and long construction periods of power units, the transition to industrialized technology with a high degree of factory readiness requires formalization of process parallelization, module enlargement, and management of transportation and installation risks. The scientific problem lies in developing a reproducible model that ensures quantitative reduction of construction time without compromising structural strength and stability.

Materials and methods. The study employs schedule network modelling, organizational and technological analysis, structural process optimization, and computational verification of temporary structural states in accordance with current construction and industry regulations. A comparison of conventional on-site construction technology and modular erection schemes was performed, taking into account factory fabrication, transportation, and installation stages of large modules. Data from typical Generation III+ power unit projects, as well as regulatory indicators of labor intensity and construction duration, were used.

Results. A formalized model was developed to assess the impact of module enlargement degree and process parallelization level on construction duration. It was established that within a module enlargement coefficient of 0.6–0.75, a 15–30 % reduction of the investment and construction cycle can be achieved while maintaining regulatory requirements for structural strength, stability, and seismic resistance. The structure of transportation and installation risks within the overall project risk system was also determined.

Conclusions. The proposed organizational and technological model provides a quantitatively verified reduction in construction time of power units without compromising safety and reliability. The methodology is reproducible and can be applied to serial construction of power units of various capacities, including small modular reactor projects.

KEYWORDS: nuclear power plant, modular construction, organizational and technological modelling, investment and construction cycle, process parallelization, module enlargement, risk management, industrialized construction

FOR CITATION: Mottaeva A.B. Organizational and technological modelling of NPP modular assembly for reducing the construction investment cycle. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(5):849-862. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.5.849-862 (rus.).

Corresponding author: Asiyat B. Mottaeva, asenka2574@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Мировая атомная энергетика сохраняет устойчивую долю в структуре глобальной генерации электроэнергии и одновременно характеризуется усложнением организационно-технологических условий реализации проектов сооружения энергоблоков. По данным IAEA¹ PRIS² за 2024–2025 гг., в эксплуатации находятся порядка 413 энергетических реакторов совокупной установленной мощностью около 380 ГВт, более 60 энергоблоков — в стадии строительства. При этом средняя фактическая продолжительность сооружения энергоблоков большой мощности в мировой практике составляет 6–8 лет, а по отдельным проектам превышает 10 лет, что сопровождается отклонениями от контрактных графиков [1–3].

Анализ крупных инфраструктурных проектов, выполненный на основе отраслевой статистики и исследований по управлению строительством, показывает, что до 60–70 % отклонений по срокам формируются организационно-технологическими факторами: несогласованностью графиков, недостаточной синхронизацией поставок и монтажа, перераспределением трудовых ресурсов, а также дефектами строительно-монтажных работ [4, 5].

В условиях высокой капиталоемкости атомного строительства увеличение продолжительности инвестиционно-строительного цикла (ИСЦ) приводит к росту совокупных затрат вследствие инфляционного удорожания, увеличения стоимости капитала и перераспределения ресурсов [1, 2, 6].

Согласно требованиям СП 48.13330 «Организация строительства»³, планирование и управление строительством объектов повышенной ответственности должны обеспечивать согласование

технологических процессов, рациональную последовательность выполнения работ и контроль критического пути проекта. Для объектов использования атомной энергии нормативные требования к безопасности установлены НП-001-15⁴ и другими отраслевыми документами, предусматривающими учет надежности конструкций и управляемости строительных стадий. Рекомендации IAEA SSG-38⁵ подчеркивают необходимость интеграции календарного планирования, обеспечения качества и риск-информированного подхода при реализации проектов атомной электростанции (АЭС) [7, 8].

В этих условиях модульная сборка рассматривается как инструмент организационно-технологической трансформации ИСЦ [9, 10]. Перенос части строительно-монтажных операций в заводские условия, укрупнение конструктивных элементов и параллелизация процессов изготовления и монтажа позволяют изменить структуру критического пути проекта [6, 11]. По данным реализованных проектов и отраслевых отчетов, применение укрупненных модулей обеспечивает сокращение продолжительности строительства на 15–30 % [3, 12, 13], при этом до 30–40 % трудоемкости строительно-монтажных работ (СМР) переносится в контролируемые производственные условия [14, 15], что снижает вариативность сроков и дефектность, подтверждая выводы международных исследований о преимуществах индустриализированной сборки [16, 17].

С позиций технологии и организации строительства ключевым является построение формализованной организационно-технологической модели модульной сборки, включающей количественную оценку влияния степени укрупнения модулей на параметры критического пути [5, 18], синхронизацию календарно-сетевых графиков (КСГ) изготовления и монтажа [7, 11], оптимизацию логистики и управление транспортно-монтажными рисками в рамках

¹ World Nuclear Performance Report 2024 // World Nuclear Association. URL: <https://world-nuclear.org/images/articles/World-Nuclear-Performance-Report-2024.pdf>

² Power Reactor Information System (PRIS) // International Atomic Energy Agency. URL: <https://pris.iaea.org/pris/>

³ СП 48.13330.2019. Организация строительства. URL: https://www.glavbukh.ru/npd/edoc/97_480597

⁴ НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. URL: https://web-develop-docs-secnrns-sites.srv2.machaon.dev/documents/nps/НП-001-15/НП-001-15_conv.pdf (дата обращения: 11.02.2026)

⁵ Construction for Nuclear Installations.

действующей нормативной базы (СП 48.13330³, СП 14.13330⁶, СП 16.13330⁷, СП 63.13330⁸, НП-001–15⁴).

Цель настоящего исследования — разработка организационно-технологической модели модульной сборки АЭС, обеспечивающей сокращение ИСЦ не менее чем на 15 % при сохранении нормативных требований надежности и безопасности [9, 13].

Для достижения поставленной цели решаются задачи анализа влияния традиционной площадочной технологии на структуру критического пути [4, 5], разработки модели параллелизации заводских и площадочных процессов [6], формирования метода оценки влияния степени укрупнения модулей на продолжительность строительства [3, 12], а также построения модели распределения транспортно-монтажных рисков в общей структуре проектных рисков [7, 11].

Объект исследования — процессы технологии и организации строительства атомных электростанций.

Предмет исследования — организационно-технологические параметры модульной сборки энергоблоков, влияющие на продолжительность ИСЦ.

Гипотеза исследования состоит в том, что формализованное организационно-технологическое моделирование модульной сборки, основанное на синхронизации производственных стадий, рациональной степени укрупнения модулей и нормативной верификации временных состояний конструкций, обеспечивает сокращение сроков строительства на 15–30 % и снижение совокупных организационно-технологических рисков [3–6, 12].

Научная новизна работы заключается в разработке интегрированной модели организационно-технологической трансформации инвестиционно-строительного цикла АЭС, учитывающей взаимосвязь между степенью укрупнения модулей, параметрами критического пути и структурой проектных рисков в условиях требований нормативной безопасности [5, 7].

Практическая значимость исследования определяется возможностью применения предложенной модели при разработке проектов организации строительства, КСГ, логистических схем и систем управления рисками при серийном сооружении энергоблоков различной мощности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании используются следующие основные понятия:

- под модульной сборкой АЭС понимается организационно-технологическая модель сооружения

⁶ СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. URL: ouzgaz.ru/upload/Betonnye_i_zhelezobetonnye_konstrukcii.pdf

⁷ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14474/>

⁸ СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. URL: https://souzgaz.ru/upload/Betonnye_i_zhelezobetonnye_konstrukcii.pdf

энергоблока, при которой укрупненные элементы высокой заводской готовности изготавливаются в контролируемых условиях и поставляются на площадку для интеграции в строительную систему [3, 10–13];

- ИСЦ рассматривается как совокупность стадий от начала СМР до ввода объекта в эксплуатацию в соответствии с действующим законодательством;

- критический путь проекта — последовательность работ календарно-сетевой модели, определяющая минимально возможную продолжительность строительства при заданной структуре взаимосвязей [8, 10];

- степень укрупнения модуля определяется как отношение объема работ, выполняемых в составе заводских модулей, к общему объему СМР по объекту [14–16];

- малые модульные реакторы (ММР) — установки мощностью до 300 МВт, основанные на принципах серийности и высокой заводской готовности [1, 3, 17]. Их развитие усиливает переход к стандартизированной модульной сборке.

По состоянию на 2026 г. реализованы первые объекты ММР (включая плавучие и наземные установки), более 70 концепций проходят стадии проектной проработки и лицензирования [1, 3]. Это формирует переход от уникального проектирования к стандартизированной модульной сборке с серийным тиражированием.

Визуализация пространственно-технологической структуры укрупненных модулей и их интеграция в общую строительную систему энергоблока представлены на рис. 1. На рис. 1 отражены перенос трудоемких и критически ответственных операций в заводские условия и последовательная интеграция модулей на площадке [10, 11].

Рис. 1 иллюстрирует перенос трудоемких операций в заводские условия как базовое условие сокращения ИСЦ.

Логическим этапом исследования выступает разработка методики количественной оценки эффекта от организационной трансформации строительства в рамках заданных нормативных ограничений. Общая методика разработки организационно-технологической модели модульной сборки, которая включает пять этапов, наглядно проиллюстрирована на рис. 2. Схема отражает декомпозицию цели исследования на задачи, методы, показатели и итоговые результаты.

На рис. 2 показана методическая последовательность: цель → задачи → методы → показатели → результат, обеспечивающая достижение сокращения ИСЦ $\geq 15\%$ при нормативной надежности.

Примененный в исследовании методический аппарат соответствует задачам исследования.

В качестве исходных данных использованы:

- укрупненные графики строительства энергоблоков поколения III+ (ВВЭР-1200, ВВЭР-ТОИ)⁹;

⁹ Проекты ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ // Росатом. URL: [tations_projects/atomnye-elektrostantsii-rossii/sovremennyye-reaktory/](https://tations.projects/atomnye-elektrostantsii-rossii/sovremennyye-reaktory/)



Рис. 1. Принципиальная схема модульной сборки энергоблока АЭС

Fig. 1. Schematic diagram of the modular assembly of the NPP power unit

- нормативные показатели продолжительности и трудоемкости (СП 48.13330³, ФЕР¹⁰);
- параметры транспортно-монтажных ограничений (СП 16.13330⁷, СП 20.13330¹¹).

Продолжительность базового периода сооружения энергоблока принята равной 60–65 мес, что соответствует фактической практике реализации российских проектов поколения III+ (Ленинградская АЭС-2¹², Нововоронежская АЭС-2¹³, Курская АЭС-2¹³) и данным публичной отчетности ГК «Росатом».

В целях подтверждения инженерной реализуемости укрупненного модуля в табл. 1 выполнена числовая верификация его монтажного (временного) состояния. Расчет проведен по основной комбинации нагрузок в соответствии со СП 20.13330:

$$\gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q + \gamma_W \cdot W, \quad (1)$$

где G — собственный вес модуля; Q — монтажные воздействия (динамика подъема учтена коэффициентом ϕ); W — ветровая нагрузка в монтажном положении. В данном примере монтажные воздействия Q учтены динамической добавкой при подъеме (коэффициент ϕ). Ветровая нагрузка W рассматривается в проверке устойчивости монтажной

схемы (горизонтальная составляющая) и в табл. 1 численно не приводится.

По результатам верификации (табл. 1) монтажное состояние укрупненного модуля удовлетворяет требованиям прочности и устойчивости ($k_s t = 1,34 \geq 1,2$), что подтверждает инженерную допустимость укрупнения при принятой массе и схеме подъема.

Вместе с тем подтверждение нормативной реализуемости монтажного состояния не определяет рациональный предел степени укрупнения. Для целей организационно-технологического моделирования требуется установить диапазон значений коэффициента K_u , при котором обеспечивается баланс между сокращением ИСЦ и соблюдением транспортно-монтажных и конструктивных ограничений.

Систематизация соответствующих расчетных зависимостей и инженерных ограничений представлена в табл. 2, формирующей расчетно-аналитическую модель обоснования коэффициента укрупнения.

Анализ представленных в табл. 2 расчетных зависимостей показывает, что коэффициент укрупнения K_u не является произвольным организационным параметром, а определяется совокупностью конструктивных, транспортных и монтажных ограничений. Предельное условие по грузоподъемности и устойчивости формирует верхнюю границу K_u , тогда как минимальный уровень укрупнения задается требованием обеспечения организационного эффекта параллелизации.

Следовательно, диапазон $0,6 \leq K_u \leq 0,75$ задается совокупностью ограничений по грузоподъемности, транспортируемости и устойчивости монтажного положения и используется далее при оценке $\Delta T(K_u)$. Для количественной оценки влияния установленного диапазона на параметры критического

¹⁰ Федеральные единичные расценки (ФЕР). URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405894703/>

¹¹ СП 20.13330. Нагрузки и воздействия. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/>

¹² Строящиеся АЭС в России. URL: [troyashchiesya-aes-v-rossii/](http://stroyshchiesya-aes-v-rossii/)

¹³ Строительство энергоблока № 8 Нововоронежской АЭС к 2036 году включено в генсхему размещения объектов электроэнергетики — 2042. URL: tations_projects/saytnovovoronezhskoy-aes/press-tsentr/novosti/47820/



Рис. 2. Структурно-логическая схема реализации методического аппарата оценки организационно-технологической эффективности модульной сборки АЭС

Fig. 2. A structural and logical scheme for the implementation of a methodological framework for assessing the organizational and technological effectiveness of modular nuclear power plant assembly

Табл. 1. Числовая верификация монтажного (временного) состояния укрупненного модуля

Table 1. Numerical verification of the mounting (temporary) state of the enlarged module

Расчетный блок Calculation module	Формула Formula	Числовой результат Numerical result	Интерпретация Interpretation
Комбинация нагрузок Load combination	$\gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q + \gamma_W \cdot W$	–	СП 20.13330 СР 20.13330
Вес с учетом динамики Weight, taking dynamics into account	$G = m \cdot g; G_{dyn} = \varphi \cdot G$	3139 → 3610 кН / kN	$m = 320 \text{ т / t}; \varphi = 1,15$
Расчетное усилие Design load	$N_{ed} = \gamma_f \cdot G_{dyn}$	3971 кН / kN	$\gamma_f = 1,1$
Проверка прочности Strength test	$N_{ed} \leq N_{Rd}$	$3971 \leq 5320 \text{ кН / kN}$	Несущая способность обеспечена Load-bearing capacity is ensured
Проверка устойчивости Stability check	$k_s t = \frac{N_{cr}}{N_{ed}}$	$1,34 \geq 1,2$	Нормативный запас выполнен The target has been met

пути далее рассматривается функциональная зависимость относительного сокращения ИСЦ $\Delta T(K_u)$ (см. рис. 3).

Зависимость $\Delta T(K_u)$ получена из календарно-сетевой модели с учетом перераспределения длительности между площадочными и заводскими стадиями и перекрытия процессов изготовления и монтажа. Заштрихованная область (0,6–0,75) соответствует рациональному диапазону коэффициента укрупнения (рис. 3).

Далее приведены аналитические зависимости:

$$T_{mod}(K_u) = T_{site}(K_u) + T_{factory}(K_u) - T_{overlap}(K_u); \quad (2)$$

$$T_{overlap}(K_u) = \alpha \cdot T_{factory}(K_u); \quad (3)$$

$$\Delta T(K_u) = \frac{T_{trad} - T_{mod}(K_u)}{T_{trad}} 100 \%. \quad (4)$$

Табл. 2. Расчетно-аналитическая модель инженерного обоснования коэффициента укрупнения

Table 2. Computational and analytical model of engineering substantiation of the enlargement coefficient

Расчетный этап Calculation stage	Формула Formula	Инженерный смысл Engineering meaning	Вывод Conclusion
Определение коэффициента укрупнения Determination of the enlargement coefficient	$K_{-u} = \frac{V_{-mod}}{V_{-tot}}$	Доля работ, перенесенных в заводские условия Share of work transferred to factory conditions	Базовый организационный параметр Basic organizational parameter
Связь с кратностью укрупнения Relationship with the enlargement multiplicity	$k_{-m} = \frac{1}{1 - K_{-u}}$	Рост кратности при увеличении K_{-u} Increase in multiplicity with increasing K_{-u}	Исключает расхождение обозначений Eliminates inconsistency in notation
Масса укрупненного модуля Mass of the enlarged module	$G_{-mod} = K_{-u} \cdot G_{-tot}$	Связь степени укрупнения с массой блока Relationship between the enlargement degree and the block mass	Замыкание инженерной логики Completion of the engineering logic
Ограничение по грузоподъемности Lifting capacity limitation	$G_{-mod} \leq G_{-cr}(R)$	Монтажная реализуемость Installation feasibility	Определяет предельную массу Determines the maximum mass
Предельное условие для K_{-u} Limit condition for K_{-u}	$K_{-u} \leq \frac{G_{-cr}(R)}{G_{-tot}}$	Инженерное ограничение укрупнения Engineering limitation of enlargement	Диапазон выводится расчетно The range is determined analytically
Рациональный диапазон Rational range	$0,6 \leq K_{-u} \leq 0,75$	Баланс сроков и ограничений Balance between schedule and limitations	Инженерно обоснованный интервал Engineering-based interval
Чувствительность продолжительности Duration sensitivity	$\Delta T(K_u) = \frac{T_{-trad} - T_{-mod}(K_u)}{T_{-trad}}$	Связь укрупнения и сокращения ИСЦ Relationship between enlargement and reduction of construction duration	Максимум ΔT достигается в диапазоне 0,6–0,75 (см. рис. 3) Maximum ΔT is achieved within the range of 0.6–0.75 (see Fig. 3)

Примечание: K_{-u} — это доля работ в модулях (0,6–0,75); k_{-m} — показатель кратности (2,5–3,5).

Note: K_{-u} is the share of work performed in modules (0.6–0.75); k_{-m} is the multiplicity factor (2.5–3.5).

Для практических оценок в допустимом диапазоне использована линейная аппроксимация зависимости $\Delta T(K_{-u})$:

$$\Delta T(K_u) = K_u \cdot (a - b \cdot (1 - \alpha)) \cdot 100 \% \quad (5)$$

Принятые параметры модели: $T_{-trad} = 62$ мес.; $\alpha = 0,60$; $a = 0,35$; $b = 0,133$. Калибровка выполнена по условию $\Delta T(0,65) = 19,3 \%$.

Как следует из рис. 3, зависимость относительного сокращения длительности строительства от коэффициента укрупнения носит квазилинейный характер. При малых значениях коэффициента укрупнения эффект параллелизации ограничен и не обеспечивает существенного сокращения длительности, тогда как при превышении верхней границы диапазона рост монтажных и логистических ограничений снижает прирост организационного эффекта.

Максимально устойчивый прирост ΔT достигается в выделенном на рис. 3 интервале, что подтверждает корректность ранее установленного рационального диапазона коэффициента укрупнения. Полученная зависимость позволяет перейти от инженерных ограничений к формализованному описанию изменения структуры критического пути и календарно-сетевой модели проекта. В следующем подраздеle выполняется формализация влияния укрупнения на продолжительность строительства с применением аналитических выражений для традиционной и модульной продолжительности и перекрытия стадий.

Таким образом, календарно-сетевое моделирование в рамках инженерно допустимого диапазона K_{-u} дает возможность количественно оценить влияние укрупнения и параллелизации на параметры критического пути без выхода за пределы нормативных инженерных ограничений.

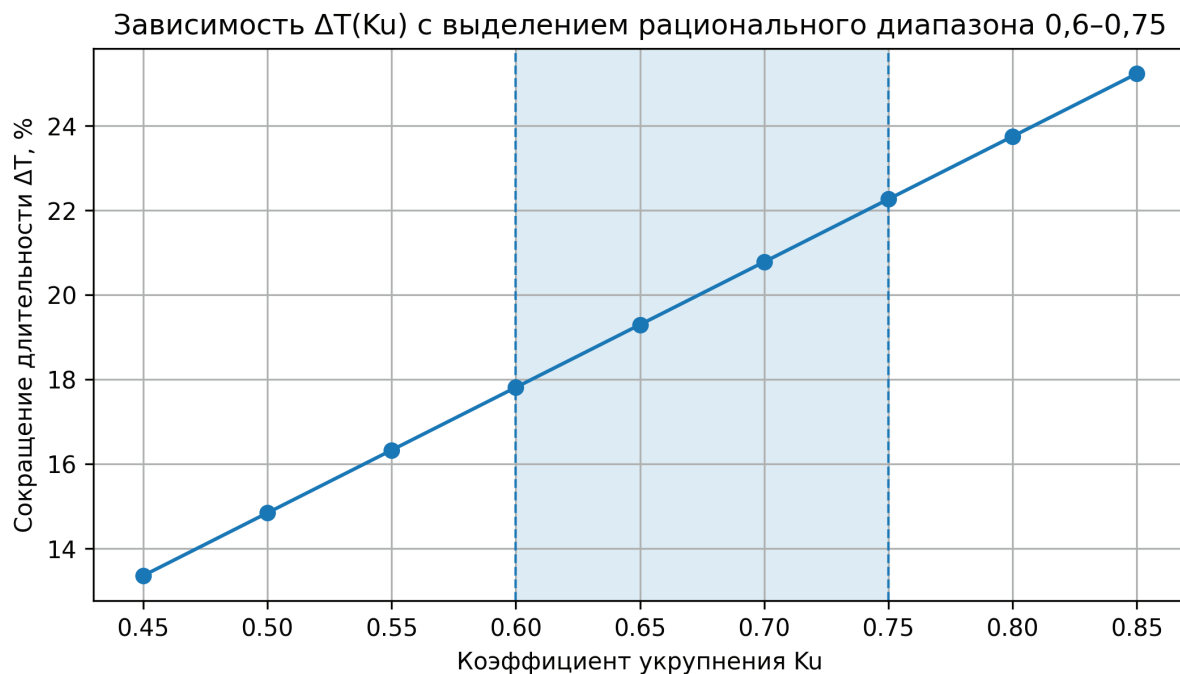


Рис. 3. Зависимость $\Delta T(K_u)$ с выделением рационального диапазона

Fig. 3. Dependence of $\Delta T(K_u)$ with allocation of a rational range

В целях формализации методического аппарата исследования разработана структурированная система расчетных зависимостей, позволяющая обеспечить количественную оценку организационно-технологического эффекта перехода к модульной сборке при одновременном соблюдении нормативных требований прочности, устойчивости и безопасности [5, 7, 9].

Представленная в табл. 3 расчетно-аналитическая модель подтверждает сокращение ИСЦ на 15–30 % в пределах допустимого диапазона K_u .

Для системного представления последовательности реализации методического аппарата выполнена визуализация причинно-следственных связей между исходными инженерными ограничениями, инженерной верификацией и организационно-технологическими решениями. Интегральная схема

Табл. 3. Расчетная модель оценки влияния укрупнения на продолжительность строительства

Table 3. A computational model for assessing the impact of enlargement on the duration of construction

Расчетный этап Calculation stage	Формула Formula	Числовой результат Numerical result	Интерпретация Interpretation
Продолжительность при традиционной технологии Duration using conventional technology	$T_{trad} = \max \Sigma t_i$	62 мес. 62 month.	Критический путь Critical path
Продолжительность при модульной технологии Duration with modular technology	$T_{mod} = T_{site} + T_{factory} - T_{overlap}$	50 мес. 50 month.	Учет перекрытия стадий Tracking the overlap between stages
Относительное сокращение ИСЦ Relative decline in the construction investment duration	$\Delta T = \frac{T_{trad} - T_{mod}}{T_{trad}} \cdot 100 \%$	19,3 %	Количественный эффект укрупнения The scale effect
Интерпретация диапазона Interpretation of the range	$0,6 \leq K_u \leq 0,75$	15–30 %	Рациональный интервал сокращения сроков A reasonable timeframe for reducing deadlines

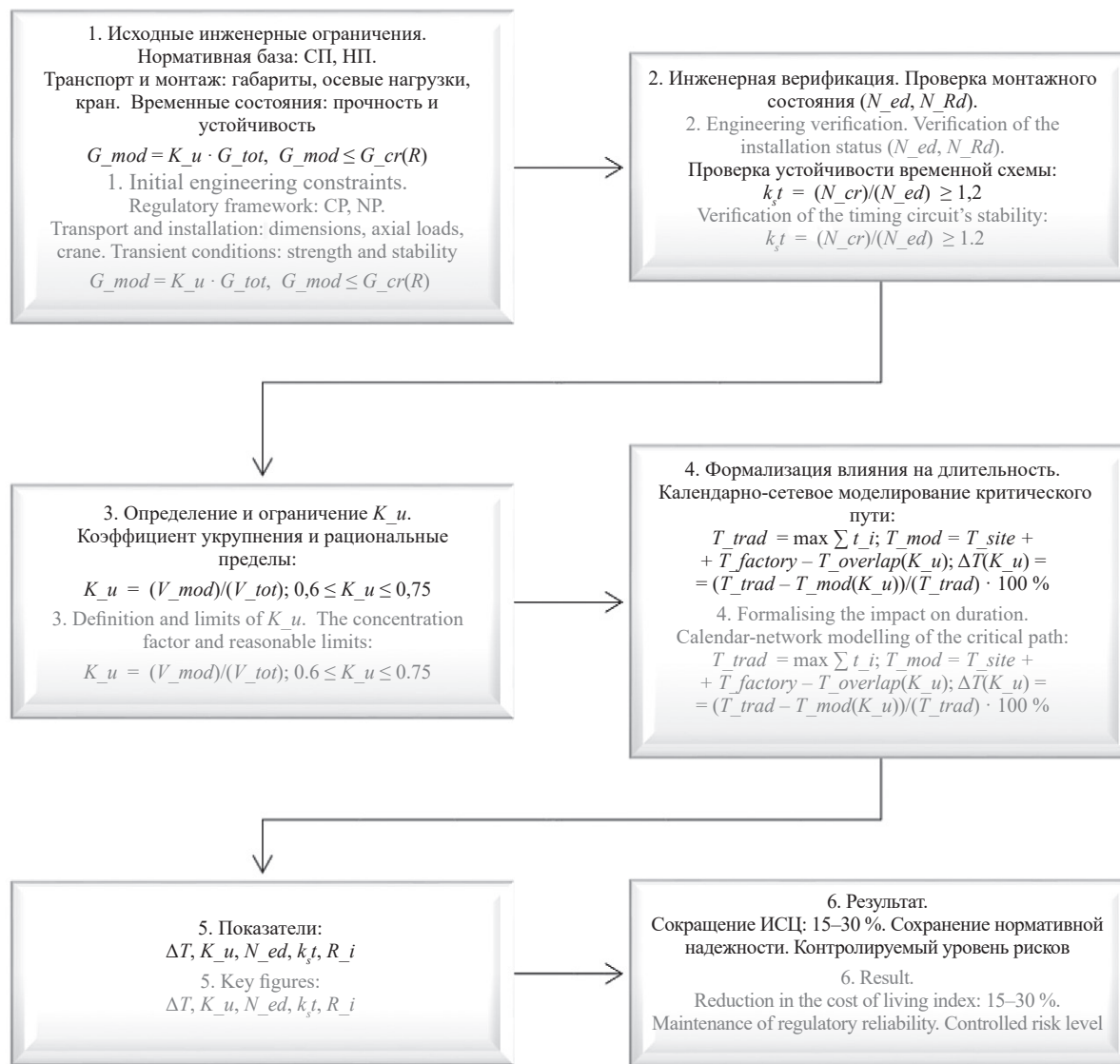


Рис. 4. Инженерно-методическая схема формирования и верификации организационно-технологической модели модульной сборки АЭС

Fig. 4. Engineering and methodological model for the formation and verification of the organizational and technological scheme of modular assembly of nuclear power plants

на рис. 4 отражает последовательность: нормативные ограничения → расчетная верификация ($N_{ed} \leq N_{Rd}; k_{st} \geq 1,2$) → определение диапазона K_u → моделирование ($T_{trad}, T_{mod}, \Delta T$). Схема фиксирует воспроизводимость организационно-инженерной модели.

Ограничения исследования. Разработанная модель калибрована по типовым проектам энергоблоков поколения III+ при базовой продолжительности строительства 62 мес. и стандартной схеме перекрытия заводских и площадочных стадий. Полученные диапазоны $0,6 \leq K_u \leq 0,75$ и $\Delta T = 15-30\%$ применимы при наличии развитой заводской инфраструктуры и устойчивой логистической цепочки поставок.

Модель не учитывает влияние сложных геотехнических условий площадки (просадочные, многолетние и мерзлые, сейсмоактивные грунты), которые могут изменять структуру нулевого цикла и пара-

метры критического пути. Также не рассмотрены особенности морской логистики тяжелых модулей, включая ограничения по портовой инфраструктуре и погодным окнам.

Дополнительно за пределами модели остаются нестандартные монтажные схемы (кольцевые подъемы, поэтапная сборка на высоте, применение уникальных кранов большой грузоподъемности), требующие индивидуальной расчетной постановки и уточнения коэффициента укрупнения.

Соответственно, предложенная модель ориентирована на серийное сооружение энергоблоков в условиях промышленно освоенных площадок и типовых логистических решений; ее применение в уникальных инженерно-географических условиях требует дополнительной адаптации параметров.

Табл. 4. Организационно-технологическая модель сокращения сроков при модульной сборке АЭС

Table 4. Organizational and technological model of shortening the time for modular assembly of nuclear power plants

Элемент модели Model element	Формализация Formalization	Интерпретация Interpretation	Количественный эффект Quantitative effect	Ограничивающий фактор Limiting factor
Традиционная схема длительности The traditional duration model	$T_{trad} = T_{pl} + T_{mon} + T_{push}$	Последовательная структура критического пути Sequential structure of the critical path	Базовая длительность 60–65 мес. Standard duration: 60–65 month.	СП 48.13330, фронт работ CP 48.13330, front work
Модульная схема (параллелизация) Modular architecture (parallelization)	$T_{mod} = T_{site} + T_{factory} - T_{overlap}$	Перекрытие заводских и площадочных стадий Overlap between the factory and site phases	–12–18 %	Логистика, синхронизация поставок Logistics, supply chain coordination
Относительное сокращение Relative reduction	$\Delta T = \frac{(T_{trad} - T_{mod})}{T_{trad}} \cdot 100 \%$	Итоговый эффект The overall effect	$\geq 15 \%$ (типично 19,3 %) $\geq 15 \%$ (typically 19.3 %)	Контрактные директивные сроки Contractual mandatory deadlines
Коэффициент укрупнения Consolidation factor	$K_u = V_{mod} / V_{tot}$	Доля работ, перенесенных в заводские условия Proportion of work carried out in factory conditions	Оптимум $0,6 \leq K_u \leq 0,75$ Optimum $0.6 \leq K_u \leq 0.75$	Транспорт/монтаж/временные состояния Transport/installation/temporary conditions
Связь с кратностью укрупнения (при необходимости) Relation to the aggregation factor (where applicable)	$k_m = 1 / (1 - K_u)$	Трансформация показателей без разрыва обозначений Transforming metrics without breaking the labelling	$k_m \approx 2,5 \dots 4,0$ при $K_u = 0,6 \dots 0,75$ $k_m \approx 2.5 \dots 4.0$ when $K_u = 0.6 \dots 0.75$	Использовать только как производную величину Use only as a derived quantity
Снижение трудоемкости монтажа Reduced labour intensity during installation	$L_{mod} = L_0(1 - \beta K_u)$	Уменьшение объема площадочных операций A reduction in the volume of field operations	–18–27 %	СП 16.13330, СП 63.13330 CP 16.13330, CP 63.13330

Примечание: K_u — коэффициент укрупнения (доля работ, выполняемых в составе заводских модулей), $0,6 \leq K_u \leq 0,75$; k_m — показатель кратности, рассчитываемый как производная величина: $k_m = 1/(1 - K_u)$; β — эмпирический коэффициент снижения трудоемкости, определяемый по нормативам трудоемкости/фактическим данным проекта; в настоящей работе принят по диапазону, приведенному в табл. 5.

Note: K_u — consolidation factor (proportion of work carried out as part of factory-built modules), $0.6 \leq K_u \leq 0.75$; k_m — multiplicity factor, calculated as a derivative: $k_m = 1/(1 - K_u)$; β — empirical labour-saving coefficient, determined based on labour-intensity standards/actual project data; in this study, it is taken from the range given in Table 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенное исследование позволило разработать и формализовать организационно-технологическую модель модульной сборки энергоблока АЭС, ориентированную на сокращение ИСЦ при соблюдении требований нормативной надежности и безопасности [4–6, 10, 12].

Анализ КСГ сооружения энергоблоков поколения III+ показал, что при традиционной площадочной технологии формирование критического пути

определяется последовательной зависимостью следующих укрупненных процессов [4, 5, 8]:

- устройство фундаментной плиты и защитной оболочки;
- монтаж крупногабаритного оборудования реакторного отделения;
- возведение строительной части машинного зала;
- пусконаладочные работы.

Табл. 5. Сравнение традиционной и модульной технологий сооружения энергоблока

Table 5. Comparison of traditional and modular power unit construction technologies

Показатель Indicator	Традиционная технология Traditional technology	Модульная технология Modular technology	Δ, %
Продолжительность строительной стадии, мес. Duration of the construction phase, months	60–65	48–55	15–22
Трудоемкость СМР Labour intensity of construction works	100 %	73–82 %	18–27
Количество монтажных стыков Number of joints	100 %	65–70 %	30–35
Объем переделок Scope of alterations	100 %	70–75 %	25–30
Доля работ в заводских условиях Proportion of work carried out in-house	≤10 %	30–40 %	+20–30 (процентных пунктов) +20–30 percentage points
Вариабельность сроков Variability in timing	Высокая High	Умеренная Moderate	–30–35

До 65–70 % продолжительности строительной стадии формируется линейной зависимостью «изготовление – поставка – монтаж», при этом часть операций выполняется последовательно из-за ограничений по фронту работ и грузоподъемности кранового оборудования [5, 6]. Установлено, что основным фактором удлинения критического пути выступает высокая доля операций, выполняемых непосредственно на строительной площадке в условиях переменной ресурсной обеспеченности и климатических воздействий [7, 8].

В связи с этим традиционная технология характеризуется значительной чувствительностью к организационно-технологическим рискам и низкой степенью параллелизации процессов [7]. В результате разработанная модель предусматривает перенос части строительно-монтажных операций в заводские условия с формированием укрупненных модулей высокой заводской готовности [3, 13, 19].

В табл. 4 представлена формализованная организационно-технологическая модель сокращения ИСЦ, увязывающая календарно-сетевую структуру проекта с инженерными ограничениями [4–6]. Показано, что эффект достигается за счет перекрытия заводских и площадочных стадий, рационального укрупнения модулей $0,6 \leq K_u \leq 0,75$ и снижения объема площадочных операций [3, 12, 13]. Границы эффекта задаются транспортно-монтажной реализуемостью и требованиями нормативных документов к временным расчетным состояниям [9, 15, 16].

Полученные результаты показывают, что именно формализованная организационно-технологическая трансформация, а не простое укрупнение конструкций обеспечивает количественно подтвержденное сокращение ИСЦ при сохранении нормативной надежности энергоблока [3, 7, 19].

В табл. 5 приведены ключевые показатели, отражающие длительность строительства, трудоемкость СМР, конструктивную сложность, объем корректировок и степень индустриализации процессов. Логика сопоставления основана на принципе переноса части операций из нестабильной площадочной среды в контролируемые заводские условия, что влияет как на параметры критического пути проекта, так и на управляемость рисков.

Анализ традиционной и модульной технологий сооружения энергоблока демонстрирует системный характер эффекта модульной технологии, что согласуется с результатами международных исследований по префабрикации и индустриализации строительства [3, 18, 19]. Сокращение продолжительности строительной стадии на 15–22 % сопровождается уменьшением трудоемкости СМР на 18–27 % и снижением количества монтажных стыков на 30–35 %, что согласуется с результатами исследований по влиянию трудоемкости и организационных факторов на продолжительность ИСЦ [5, 8].

Одновременно объем переделок сокращается на 25–30 %, а доля заводской готовности возрастает до 30–40 %, что подтверждает выводы о повышении управляемости процессов при индустриализации строительства [10–14].

Снижение вариабельности сроков свидетельствует о стабилизации КСГ и уменьшении организационно-технологических рисков проекта [7].

Следовательно, модульная сборка обеспечивает не только сокращение сроков, но и повышение технологической устойчивости проекта, формируя интегральный эффект в части надежности и управляемости [6, 19, 20].

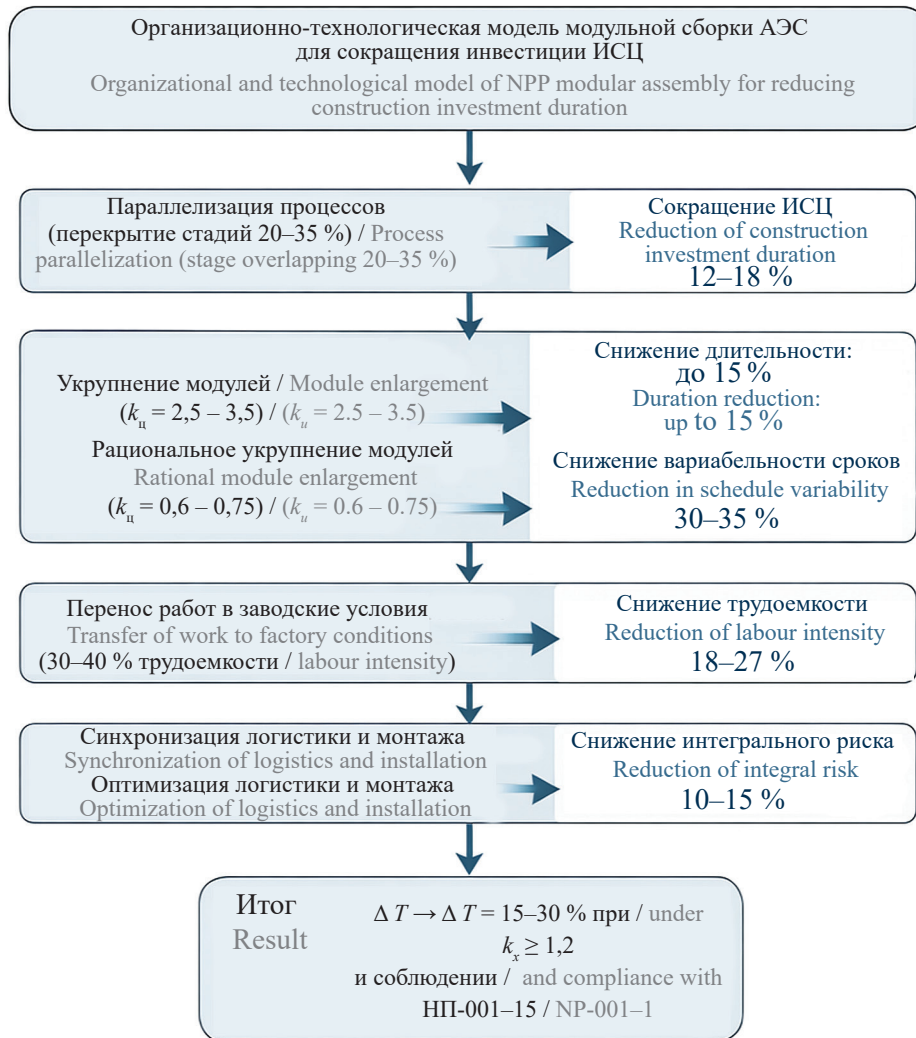


Рис. 5. Взаимосвязь модели, механизма и количественного эффекта при модульной технологии сооружения АЭС

Fig. 5. The relationship of the model, mechanism and quantitative effect in the modular technology of NPP construction

Представленная на рис. 5 схема демонстрирует, что сокращение ИСЦ формируется как результат совокупного действия взаимосвязанных механизмов: параллелизации процессов, рационального укрупнения модулей ($k_m \approx 2,5-3,5$), переноса работ в заводские условия и синхронизации логистики и монтажа. Комплексный характер воздействия указанных факторов соответствует выводам исследований по организационно-технологическому моделированию и индустриализации строительства [3, 6, 19].

Каждый механизм влияет на различные элементы критического пути проекта: устранение линейной зависимости операций обеспечивает сокращение продолжительности строительства на 12–18% [8]; снижение количества монтажных стыков уменьшает трудоемкость на 18–27% [12]; стандартизация и заводская сборка сокращают объем переделок на 25–30% [114]; оптимизация логистики и синхронизация поставок снижают интегральный организационно-технологический риск проекта на 10–15% [11, 19].

Таким образом, эффект модульной технологии носит системный характер и обусловлен изменением организационной архитектуры проекта, а не отдельным техническим приемом. Комплексная реализация указанных механизмов обеспечивает достижение целевого сокращения сроков не менее 15% при сохранении нормативной надежности и безопасности энергоблока [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании разработана организационно-технологическая модель модульной сборки энергоблока АЭС, основанная на увязке календарно-сетового анализа, параметров укрупнения модулей и расчетной проверки временных состояний конструкций.

Числовая верификация монтажного положения укрупненного модуля ($m = 320$ т) показала выполнение условий прочности и устойчивости ($k_s t = 1,34 \geq 1,2$). На основе ограничений по грузоподъемности, транс-

портируемости и временным расчетным состояниям установлен рациональный диапазон коэффициента укрупнения $0,6 \leq K_u \leq 0,75$.

Календарно-сетевое моделирование показало, что при перекрытии заводских и площадочных стадий и перераспределении длительности критического пути обеспечивается сокращение продолжительности строительства с 62 до 50 мес., что соответствует относительному снижению 19,3%. В пределах допустимого диапазона K_u устойчивый эффект сокращения ИСЦ составляет 15–30% в зависимости от степени параллелизации и структуры проекта.

Полученные результаты подтверждают, что организационный эффект модульной сборки достигается при условии инженерной реализуемости укрупненных модулей и соблюдения нормативных требований. Модель позволяет прогнозировать изменение длительности строительства на стадии планирования и может применяться при серийном сооружении энергоблоков поколения III+ и проектах малых модульных реакторов.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на апробацию модели в реальных проектах и уточнение параметров чувствительности в зависимости от условий площадки и схем логистики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Крупнов Ю.А., Моттаева А.Б. Тенденции и перспективы развития мирового энергетического рынка: прогноз на 2025 г. // E-Management. 2025. Т. 8. № 1. С. 43–54. DOI: 10.26425/2658-3445-2025-8-1-43-54. EDN OVQJAM.
2. Новак А.В. Развитие атомной энергетики — необходимое условие глобальной климатической повестки // Энергетическая политика. 2021. № 9 (163). С. 6–11. DOI: 10.46920/2409-5516_2021_9163_6. EDN QJQUEM.
3. Wrigley P.A., Wood P., O'Neill S., Hall R., Robertson D. Off-site modular construction and design in nuclear power : a systematic literature review // Progress in Nuclear Energy. 2021. Vol. 134. P. 103664. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103664. EDN GIPRAI.
4. Адамцевич Л.А., Лapidус А.А. Организационно-технологические решения при управлении жизненным циклом объектов строительства в проектах комплексного развития территорий // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. № 3. С. 176–188. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.11. EDN KSDBEV.
5. Березка В.В., Баронин С.А., Бредихин В.В., Зобнев А.В. Организация промышленного строительства АЭС на глобальном рынке с учетом моделирования надежности на прединвестиционных этапах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25. № 3. С. 56–69. DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-3-56-69. EDN XQPAOX.
6. Lapidus A.A., Adamtsevich L.A. Digital transformation of life cycle management processes for residential and engineering infrastructure facilities in complex development of territories // Real Estate: Economics, Management. 2025. Issue 2. Pp. 6–12. EDN NMXPQG.
7. Морозенко А.А., Кабанов А.В., Шашиков А.А. Методика формирования организационной структуры проекта при крупноблочном возведении АЭС // Строительное производство. 2023. № 2. С. 119–125. DOI: 10.54950/2658534020232119. EDN BGCFHM.
8. Шашиков А.А. Максимальная степень индустриализации возведения АЭС // Строительное производство. 2025. № 3. С. 32–38. DOI: 10.54950/26585340_2025_3_32. EDN PRQQVP.
9. Маркелов М.Ю., Алехин В.Н., Ушаков О.Ю., Зубрицкий М.А. Особенности проектирования арочных покрытий объектов использования атомной энергии в процессе возведения // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2024. № 2 (61). С. 75–79. DOI: 10.25628/UNIP.2024.61.2.012. EDN EWERIX.
10. Морозенко А.А., Шашиков А.А. Организационно-технологические аспекты крупноблочного возведения атомных электростанций // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 5 (95). С. 28–33. EDN YEMCPG.
11. Морозенко А.А., Кабанов А.В., Шашиков А.А. Методика формирования организационной структуры проекта при крупноблочном возведении АЭС // Строительное производство. 2023. № 2. С. 119–125. DOI: 10.54950/2658534020232119. EDN BGCFHM.
12. Коротких Д.Н., Корнев О.А., Белов В.В., Силантьев А.С., Капустин Д.Е. Обзор опыта возведения АЭС с применением модульных конструкций с внешним листовым армированием // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 10. С. 1696–1712. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1696-1712. EDN AUFQZV.
13. Шашиков А.А. Максимальная степень индустриализации возведения АЭС // Строительное производство. 2025. № 3. С. 32–38. DOI: 10.54950/26585340_2025_3_32. EDN PRQQVP.
14. Амбарцумян С.А., Мочалин Д.Е., Сьбева Ю.А. Практичность модульного строительства: опыт прошлого и перспективы // Строительное производство. 2024. № 2. С. 61–65. DOI: 10.54950/26585340_2024_2_61. EDN ELYXOI.
15. Келасьев Н.Г., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Терехов И.А., Гасиев А.А., Шамаков С.Д. Конструктивные системы модульных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 6. С. 24–31. DOI: 10.33622/0869-7019.2025.06.24-31. EDN MOZMGM.
16. Широков В.С. Конструктивные особенности модульных зданий // Вестник евразийской науки.

2022. Т. 14. № 3. DOI: 10.15862/03savn322. EDN UASGWR.

17. Моттаева А.Б. Современные тренды развития инфраструктуры атомной энергетики // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2025. № 3. С. 182–188. EDN TKWIRZ.

18. Bruun E.P.G., Parascho S., Adriaenssens S. Collaborative robotic material processing for the circular economy / С. De Wolf, S. Cetin, N.M.P. Bocken (eds.) // Circular Built Environment in the Digital Age. Cham: Springer. 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-39675-5_8

19. O'Connor J.T., O'Brien W.J., Choi J.O. Industrial project execution planning: modularization versus stick-built // Practice Periodical on Structural Design and Construction. 2016. Vol. 21. Issue 1. P. 04015014. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000270

20. Джолдошева Т.Ю., Моттаева А.Б. Влияние инновационных элементов инфраструктуры на устойчивое развитие атомной энергетики России // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2025. № 4. С. 184–192. EDN WAWBIA.

Поступила в редакцию 29 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 2 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 2 апреля 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Асият Бахауовна Моттаева** — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры общего и проектного менеджмента; **Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации**; 109337, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 49; РИНЦ ID: 802234, Scopus: 57194839377, ORCID: 0000-0001-5854-6944; asenka2574@gmail.com.

REFERENCES

1. Krupno Yu.A., Mottaeva A.B. Trends and prospects for the development of the global energy market: forecast for 2025. *E-Management*. 2025; 8(1):43-54. DOI: 10.26425/2658-3445-2025-8-1-43-54. EDN OVQJAM. (rus.).

2. Novak A. Nuclear energy development is a prerequisite for the global climate agenda. *Energy Policy*. 2021; 9(163):6-11. DOI: 10.46920/2409-5516_2021_9163_6. EDN QJQUEM. (rus.).

3. Wrigley P.A., Wood P., O'Neill S., Hall R., Robertson D. Off-site modular construction and design in nuclear power : a systematic literature review. *Progress in Nuclear Energy*. 2021; 134:103664. DOI: 10.1016/j.pnucene.2021.103664. EDN GIPRAI

4. Adamtsevich L.A., Lapidus A.A. Organizational and technological solutions for managing the life cycle of construction projects in integrated territorial development projects. *Construction: Science and Education*. 2025; 15(3):176-188. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.11. EDN KSDBEB. (rus.).

5. Berezka V.V., Baronov S.A., Bredikhin V.V., Zobnev A.V. Organization of industrial construction of nuclear power plants in the global market, taking into account reliability modeling at pre-investment stages. *Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(3): 56-69. DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-3-56-69. EDN XQPAOX. (rus.).

6. Lapidus A.A., Adamtsevich L.A. Digital transformation of life cycle management processes for residential and engineering infrastructure facilities in complex development of territories. *Real Estate: Economics, Management*. 2025; 2:6-12. EDN NMXQPG.

7. Morozenko A.A., Kabanov A.V., Shashkov L.A. Methodology for the formation of the organi-

zational structure of the project during the large-block construction of NPP. *Construction Production*. 2023; 2:119-125. DOI: 10.54950/2658534020232119. EDN BGCFFHM. (rus.).

8. Shashkov A. Maximum degree of industrialization of NPP construction. *Construction Production*. 2025; 3:32-38. DOI: 10.54950/26585340_2025_3_32. EDN PRQQVP. (rus.).

9. Markelov M.Yu., Alekhin V.N., Ushakov O.Yu., Zubritsky M.A. Arched roof structures designing features for nuclear energy facilities during construction. *Akademicheskie Vestnik UralNIiproekt RAASN*. 2024; 2(61):75-79. DOI: 10.25628/UNIIP.2024.61.2.012. EDN EWERIX. (rus.).

10. Morozenko A.A., Shashkov A.A. Organizational and technological aspects of large-scale construction of nuclear power plants. *Science and Business: Ways of Development*. 2019; 5(95):28-33. EDN YEMCPG. (rus.).

11. Morozenko A.A., Kabanov A.V., Shashkov L.A. Methodology for the formation of the organizational structure of the project during the large-block construction of NPP. *Construction Production*. 2023; 2:119-125. DOI: 10.54950/2658534020232119. EDN BGCFFHM. (rus.).

12. Korotkikh D.N., Kornev O.A., Belov V.V., Silantiev A.S., Kapustin D.E. Review of experience in the construction of npp using modular structures with external sheet reinforcement. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(10):1696-1712. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1696-1712. EDN AUFQZV. (rus.).

13. Shashkov A. Maximum degree of industrialization of NPP construction. *Construction Production*.

2025; 3:32-38. DOI: 10.54950/26585340_2025_3_32. EDN PRQQVP. (rus.).

14. Ambartsumyan S.A., Mochalin D.E., Siebeva Ju.A. The practicality of modular construction: past experience and prospects. *Construction Production*. 2024; 2:61-65. DOI: 10.54950/26585340_2024_2_61. EDN ELYXOI. (rus.).

15. Kelasyev N.G., Trekin N.N., Kodysh E.N., Terekhov I.A., Gasiev A.A., Shmakov S.D. Structural systems of modular buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2025; 6:24-31. DOI: 10.33622/0869-7019.2025.06.24-31. EDN MOZMGM. (rus.).

16. Shirokov V.S. Design features of modular buildings. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022; 14(3). DOI: 10.15862/03savn322. EDN UASGWR. (rus.).

17. Mottaeva A.B. Current trends in the development of nuclear energy infrastructure. *Forging and Stamping Production*. 2025; 4:184-192. EDN WAWBIA. (rus.).

18. Bruun E.P.G., Parascho S., Adriaenssens S. Collaborative robotic material processing for the circular economy / C. De Wolf, S. Cetin, N.M.P. Bocken (eds.) *Circular Built Environment in the Digital Age*. Cham: Springer. 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-39675-5_8

19. O'Connor J.T., O'Brien W.J., Choi J.O. Industrial project execution planning: modularization versus stick-built. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2016; 21(1):04015014. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000270

20. Dzholdosheva T.Yu., Mottaeva A.B. The impact of innovative infrastructure elements on the sustainable development of Russia's nuclear energy industry. *Forging and Stamping Production*. 2025; 4:184-192. EDN WAWBIA. (rus.).

Received November 22, 2025.

Adopted in revised form on March 2, 2026.

Approved for publication on April 2, 2026.

BIONOTES: **Asiat B. Mottaeva** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General and Project Management; **Financial University under the Government of the Russian Federation**; 49 Leningradsky prospekt, Moscow, 109337, Russian Federation; ID RSCI: 802234, Scopus: 57194839377, ORCID: 0000-0001-5854-6944; asenka2574@gmail.com.

НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ ЛЕОНТЬЕВ



22 мая 2026 г. исполнилось 100 лет со дня рождения доктора технических наук, профессора Н.Н. Леонтьева — видного советского и российского ученого в области строительной механики и теории упругости, члена-корреспондента РААСН, ученика и сподвижника В.З. Власова.

В 1949 г. Н.Н. Леонтьев, закончив факультет ПГС МИСИ им. В.В. Куйбышева с красным дипломом, выполненным под руководством П.Л. Пастернака, был принят в аспирантуру по рекомендации И.М. Рабиновича, где под эгидой В.З. Власова с блеском защитил кандидатскую диссертацию «Приложение вариационного метода Власова к расчету фундаментов гидротехнических сооружений».

В 1950-х гг. Николай Николаевич совместно с В.З. Власовым развивал направление вариационных и численных методов строительной механики, в частности расчета стержневых и тонкостенных пространственных систем. В дальнейшем Н.Н. Леонтьев работал в области теории расчета пластин и оболочек при различных воздействиях (статических, динамических, термических), а также в области теории расчета сооружений на упругом основании. В 1971 г. Н.Н. Леонтьев защитил докторскую диссертацию на тему «Балки, плиты и оболочки на упругом основании», а в 1973 г. ему было присвоено ученое звание профессора.

С 1975 по 2005 г. Николай Николаевич бессменно возглавлял родную кафедру строительной механики МИСИ – МГСУ, где блистали профессора, д.т.н. Б.Г. Коренев, А.Р. Ржаницын, Г.К. Клейн, Д.Н. Соболев и многие другие, а кафедра стала мощным центром исследования различных аспектов строительной механики, чему способствовали умение Н.Н. Леонтьева руководить коллективом, проявляя при этом присущую ему интеллигентность, отзывчивость, скромность, а порою и тонкий дипломатический подход.

Многие годы Н.Н. Леонтьев возглавлял специализированный диссертационный совет МГСУ по строительной механике, Научно-методический совет по сопротивлению материалов, строительной механике и теории упругости Министерства высшего образования. Был деканом факультетов конструкций промышленного и гражданского строительства (КПГС), теплоэнергетического строительства (ТЭС).

В 1963–1965 гг. Н.Н. Леонтьев руководил группой советских преподавателей и был советником ректора Национального политехнического института Камбоджи, а в 1971–1974 гг. работал советником ректора Национальной инженерной школы Туниса.

Н.Н. Леонтьев награжден орденом «Знак Почета», двумя орденами Камбоджи, почетным знаком «Отличник высшей школы». Ему были присвоены звания «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР», «Почетный профессор МГСУ», «Почетный строитель Москвы», «Почетный строитель России». Н.Н. Леонтьев, будучи блестящим лектором и методистом, вел активную преподавательскую работу, создал ряд основополагающих учебников и учебных пособий. Под его научным руководством были защищены 3 докторские и более 30 кандидатских диссертаций.

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). Все иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Файлы растровых изображений должны предоставляться с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 1200 × 1200 px, в файлах формата .jpg, .tiff. Графики, чертежи и иллюстрации, созданные с помощью программ векторной графики (CorelDraw, Excel, Adobe Illustrator и прочих), следует экспортировать в PDF-файл из этой программы (предпочтительно), либо предоставлять исходник в формате той программы, в которой они созданы. 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 желательнее раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводятся ссылки на источники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в

Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Bi o n o t e s: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В. В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

ДЛЯ ЗАМЕТОК

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2026 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2026 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма

платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

