

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3

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

# ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 21. Выпуск 3  
2026**

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

Сквозной номер 208

# VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 21. Issue 3  
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

<b>Наименование органа, зарегистрировавшего издание:</b>	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.
<b>ISSN</b>	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
<b>Периодичность:</b>	12 раз в год
<b>Учредители:</b>	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.
<b>Выходит при научно-информационной поддержке:</b>	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
<b>Издатель:</b>	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: <a href="http://www.mgsu.ru">www.mgsu.ru</a> E-mail: <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>
<b>Типография:</b>	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
<b>Сайт журнала:</b>	<a href="http://vestnikmgsu.ru">http://vestnikmgsu.ru</a>
<b>E-mail:</b>	<a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>
<b>Тел.:</b>	(495) 287-49-14, доб. 24-76
<b>Подписка и распространение:</b>	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
<b>Подписан в печать</b>	30.03.2026.
<b>Подписан в свет</b>	31.03.2026.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 19,3. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 90

## 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 Дельфта, Королевство Нидерландов

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

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

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

**Забигнев 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

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

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

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

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

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

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

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

## Редакция журнала

**Выпускающий редактор:** Алла Русланбековна Табекова

**Редактор:** Татьяна Владимировна Бердникова

**Корректор:** Оксана Валерьевна Ермихина

**Дизайн и верстка:** Алина Юрьевна Байкова

**Перевод на английский язык:** Ольга Валерьевна Юденкова

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 <sup>MGSU</sup>

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

<b>ISSN</b>	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
<b>Publication Frequency:</b>	Monthly
<b>Founders:</b>	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.
<b>The Journal enjoys the academic and informational support provided by</b>	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
<b>Publisher:</b>	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: <a href="http://www.mgsu.ru">www.mgsu.ru</a> E-mail: <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>
<b>Printing House:</b>	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.
<b>Website journal:</b>	<a href="http://vestnikmgsu.ru">http://vestnikmgsu.ru</a>
<b>E-mail:</b>	<a href="mailto:vestnikmgsu@mgsu.ru">vestnikmgsu@mgsu.ru</a> , <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>
<b>Subscription:</b>	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
<b>Signed for printing:</b>	31.03.2026

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*

## 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

*М.Н. Кирсанов*

**Методы аналитического расчета частоты собственных колебаний фермы пространственной консоли. . . . . 315**

*Д.А. Беркаусов, А.Л. Невзоров*

**Анализ результатов испытаний забивных свай статической нагрузкой . . . . . 323**

*С.А. Зенин, А.М. Бударин, Е.А. Редикунцев*

**Использование регрессионного анализа для совершенствования методики расчета железобетонных конструкций на действие поперечной силы. . . . . 333**

*И.В. Демьянушко, И.А. Карпов, А.Г. Локить*

**Определение фактического численного значения величины горизонтальной поперечной нагрузки от удара транспортного средства о бетонное парапетное дорожное ограждение. . . . . 350**

*С.Н. Маиталер, В.Н. Левченко, К.А. Казак*

**Исследование напряженно-деформированного состояния конструкции фундамента с учетом влияния повышенных температур на механические характеристики высокопрочного сталефибробетона . . . . . 373**

## СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*О.А. Михайлова, В.В. Ядыкина, А.Е. Акимов*

**Влияние восковых температуропонижающих добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 на долговечность асфальтобетона. . . . . 389**

*С.Д. Епихин, А.С. Иноземцев*

**Влияние полого и плотного заполнителя на реологию самоуплотняющихся бетонных смесей . . . . . 399**

## ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*О.А. Малыгина, В.И. Соколов*

**Прогнозирование тепловых потерь через ограждающие конструкции с учетом изменения влажности материалов. . . . . 411**

## ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

*А.А. Комаров, Ю.В. Брянская*

**Параметры ударного воздействия при аварийном падении тела на жидкость. . . . . 422**

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*Е.А. Король, А.Г. Гудкова, Р.С. Петросян, Д.Д. Антониади*

**Прогнозирование динамики изменения продолжительности работ по капитальному ремонту зданий за счет варьирования численности трудовых ресурсов . . . . . 435**

*Ф. Бушина, Ю.А. Ковальчук*

**Обеспечение внутрикорпоративной ответственности в управлении персоналом строительных компаний (практика реализации в Чешской Республике) . . . . . 444**

**Требования к оформлению научной статьи . . . . . 460**

# CONTENTS

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

*Mikhail N. Kirsanov*

**Methods of analytical calculation of a spatial console truss natural oscillations frequency. . . . . 315**

*Dmitry A. Berkausov, Alexander L. Nevzorov*

**The analysis of static load tests results of driven piles . . . . . 323**

*Sergei A. Zenin, Alexander M. Budarin, Evgeny A. Redikultsev*

**Application of regression analysis to improve the shear design method for reinforced concrete structures . . . . . 333**

*Irina V. Demiyanyushko, Ilya A. Karpov, Alexey G. Lokit*

**Determination of the actual value of horizontal transverse load from vehicle impact on a concrete parapet road barrier . . . . . 350**

*Sergey N. Mashtaler, Viktor N. Levchenko, Kirill A. Kazak*

**Investigation of the stress-strain state of the foundation structure, taking into account the influence of elevated temperatures on the mechanical characteristics of high-strength steel fibre concrete . . . . . 373**

## CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

*Ol'ga A. Mihailova, Valentina V. Yadykina, Andrej E. Akimov*

**Influence of wax temperature-reducing additives Viscodor PV-2 and Licomont BS-100 on the durability of asphalt concrete . . . . . 389**

*Sergey D. Epikhin, Aleksandr S. Inozemtcev*

**The effect of hollow and dense aggregates on the rheology of self-compacting concrete . . . . . 399**

## ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

*Oksana A. Malygina, Vladimir I. Sokolov*

**Predicting thermal loss through building envelopes taking into account changes of material moisture content . . . . . 411**

## HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

*Alexandr A. Komarov, Yuliya V. Bryanskaya*

**Impact parameters in case of an emergency fall of a body onto a liquid . . . . . 422**

## TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

*Elena A. Korol, Anna G. Gudkova, Rima S. Petrosyan, Diana D. Antoniad*

**Prediction of major building repair duration as a function of workforce size . . . . . 435**

*Filip Busina, Julia A. Kovalchuk*

**Ensuring internal corporate responsibility in personnel management of construction companies (implementation practice in the Czech Republic) . . . . . 444**

**Requirements for research paper design . . . . . 460**

## 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).

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.074:531.391.3

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.315-322

## Методы аналитического расчета частоты собственных колебаний фермы пространственной консоли

Михаил Николаевич Кирсанов

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Расчет частоты собственных колебаний строительных конструкций, как правило, выполняется численными методами. Для оценки границ частоты колебаний простых статически определимых конструкций известны методы получения аналитических решений. Если конструкция регулярная и имеет периодическую структуру, то возможности аналитических методов расширяются. С помощью метода индукции в расчетную формулу для собственной частоты можно ввести дополнительный важный параметр — число периодических структур конструкции, например число панелей. Приближенный метод Рэлея дает оценку частоты колебаний сверху, а метод Донкерлея — оценку снизу. Предлагается схема консольной пространственной статически определимой фермы с регулярной структурой и приводится вывод формулы для ее первой частоты колебаний тремя аналитическими методами.

**Материалы и методы.** Ферма состоит из шести соединенных по длинным сторонам плоских ферм с раскосной решеткой. Крепление консольной конструкции к вертикальному основанию выполнено на шести опорах. Для определения жесткости фермы используется формула Максвелла – Мора и система компьютерной математики Maple. Выводится формула для зависимости первой частоты колебаний на основе методов Донкерлея и Рэлея, в которые вносятся упрощения, связанные с суммированием. Зависимость частоты от числа панелей находится индуктивным методом обобщения результатов, полученных для отдельных решений в символьном виде на произвольный случай.

**Результаты.** Аналитические решения сравниваются с численным, полученным для первой частоты из анализа спектра частот. Показано, что точность аналитических решений немонотонно зависит от числа панелей, и для трех использованных методов эта зависимость разная.

**Выводы.** Модифицированный метод Рэлея для небольшого числа панелей по сравнению с методами на основе подхода Донкерлея продемонстрировал наибольшую точность. Погрешность всех трех методов существенно зависит от размеров конструкции и числа панелей. Аналитическая форма результатов позволяет использовать найденные решения в задачах оптимизации конструкции.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** плоская ферма, аналитическое решение, собственная частота, Maple, метод Донкерлея, метод коллокации, вторая собственная частота

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кирсанов М.Н. Методы аналитического расчета частоты собственных колебаний фермы пространственной консоли // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 3. С. 315–322. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.315-322

Автор, ответственный за переписку: Михаил Николаевич Кирсанов, c216@ya.ru.

## Methods of analytical calculation of a spatial console truss natural oscillations frequency

Mikhail N. Kirsanov

National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI); Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Numerical methods are usually used to calculate the natural oscillation frequency of building structures. Methods for obtaining analytical solutions are known to estimate the oscillation frequency limits of simple statically determinate structures. If the structure is regular and has a periodic structure, the capabilities of analytical methods are expanded. The induction method adds an additional important parameter to the solution formula — the number of periodic structures of the structure, for example, the number of panels. The approximate Rayleigh method gives an upper estimate of the oscillation frequency, and the Dunkerley method gives a lower estimate. In this paper, a diagram of a cantilever spatial statically determinate truss with a regular structure is proposed and a formula for its first oscillation frequency is derived using three analytical methods.

**Materials and methods.** The truss consists of six flat trusses with a diagonal lattice connected along their long sides. The cantilever structure is fastened to the vertical base on six supports. To determine the rigidity of the truss, the Maxwell – Mohr formula and the Maple computer mathematics system are used. A formula is derived for the dependence of the first oscillation frequency based on the Dunkerley and Rayleigh methods, which are simplified due to summation. The dependence of the frequency on the number of panels is found by the inductive method of generalizing the results obtained for individual solutions in symbolic form to an arbitrary case.

**Results.** Analytical solutions are compared with the numerical one obtained for the first frequency from the frequency spectrum analysis. It is shown that the accuracy of the analytical solution depends non-monotonically on the number of panels and this dependence is different for the three methods used.

**Conclusions.** The modified Rayleigh method for a small number of panels showed the highest accuracy compared to the methods based on the Dunkerley approach. The error of all three methods depends significantly on the dimensions of the structure and the number of panels. The analytical form of the results allows using the found solutions in design optimization problems.

**KEYWORDS:** spatial truss, consol, analytical solution, natural frequency, Maple, Rayleigh method, Dunkerley method

**FOR CITATION:** Kirsanov M.N. Methods of analytical calculation of a spatial console truss natural oscillations frequency. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(3):315-322. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.315-322 (rus.).

*Corresponding author:* Mikhail N. Kirsanov, C216@ya.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Расчет собственных частот конструкций является одной из наиболее распространенных задач строительной механики. Обычно для этого применяются численные методы, реализованные в специальных инженерных программах с применением метода конечных элементов (МКЭ) [1, 2]. В основу расчетов элементов конструкций положен МКЭ в форме классического смешанного метода [3]. Аналитические решения задач строительных конструкций возникли как альтернатива численным методам в основном на базе систем компьютерной математики Mathematica [4] и Maple [5, 6]. Расчетные формулы для собственной частоты колебаний плоской статически определимой фермы с шпренгельной решеткой и зависимость области резонансно безопасных частот от размеров получены в работах [7, 8]. В исследовании [9] методами Донкерлея и Рэлея получены аналитические оценки первой собственной частоты колебаний плоской распорной фермы рамного типа и численно проанализирован весь частотный спектр конструкции. Методы Донкерлея и Рэлея сравниваются в труде [10] на примере расчета основной частоты колебаний плоской балочной фермы с простой треугольной решеткой. Получены спектр частот колебаний плоской балочной фермы и простое аналитическое выражение для первой частоты [11]. Аналитические решения для пространственных стержневых конструкций встречаются реже. Методом индукции выведена формула для частоты колебаний Г-образной пространственной фермы с целью обобщения решения на произвольное число панелей [12]. Аналогичным методом получено решение и для пространственной консоли [13], составленной из трех плоских ферм с крестообразной решеткой. Статические деформации фермы составной пространственной рамы изучены в аналитическом виде [14]. Рассчитаны деформации прямоугольной в плане пространственной фермы четырехскатного покрытия [15]. Получены формулы для собственной частоты шестигранной фер-

мы башенного типа с произвольным числом панелей с учетом различных сечений в стержнях методом Донкерлея [16]. Основные вопросы аналитических расчетов регулярных статически определимых стержневых систем впервые подняли R.G. Hutchinson и N.A. Fleck [17, 18]. Теория и некоторые методы расчета регулярных стержневых систем изложены в публикации [19]. Проблемы оптимизации и расчета регулярных стержневых систем изучались в работах А. Kaveh [20, 21].

В настоящем исследовании предлагаются регулярная модель пространственной стержневой конструкции консольного типа и методы аналитического расчета ее первой частоты собственных колебаний.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Модель конструкции. Методы расчета частоты

Горизонтально расположенная пространственная консольная ферма длиной  $na$  и общей высотой  $3h$  крепится к вертикальной стенке на сферическом шарнире  $A_1$ , цилиндрическом  $A_3$  и четырех горизонтальных стержнях  $A_2, A_4, A_5, A_6$  (рис. 1). Ширина фермы равна  $2b$ . Всего в конструкции  $h = 18(n + 1)$  шарнирно соединенных стержней, включая девять опорных, и  $K = 6(n + 1)$  внутренних узлов.

Ферма составлена из шести соединенных по длинным сторонам плоских раскосных ферм одинаковых по структуре и трех дополнительных стержней на свободном конце, направленных радиально из среднего узла нижней грани фермы (рис. 2).

*Метод Донкерлея.* Есть несколько способов получения аналитических оценок первой частоты собственных колебаний фермы. Метод парциальных частот Донкерлея дает простую нижнюю оценку первой частоты системы с  $K$  степенями свободы [8]:

$$\omega_D^{-2} = \sum_{i=1}^K \omega_i^{-2}, \quad (1)$$

где  $\omega_i$  — частота колебания отдельной массы  $m$  в узле  $i$ . Если рассматривать только вертикальные

по оси  $z$  колебания узлов, пренебрегая движениями узлов по направлению других осей, то число степеней свободы в такой упрощенной системе равно числу узлов  $K$ . Уравнение колебаний отдельной точки массой  $m$  по оси  $z$  имеет вид:  $m\ddot{z}_i + d_i z_i = 0$ , где  $z_i$  — смещение массы по оси  $z$ ;  $\ddot{z}_i$  — ее ускорение;  $d_i$  — жесткость узла в конструкции. Парциальная частота массы:  $\omega_i = \sqrt{d_i/m}$ . Жесткость вычисляется как величина, обратная податливости  $\delta_p$ , по формуле Максвелла – Мора:

$$\delta_i = 1/d_i = \sum_{j=1}^n (S_j^{(i)})^2 l_j / (EF), \quad (2)$$

где  $S_j^{(i)}$  — усилие в стержне с номером  $j$  от действия единичной вертикальной силы, приложенной к массе с номером  $i$ ;  $EF$  — продольная жесткость стержней одинаковая у всех стержней конструкции. Из выражения (1) следует:

$$\omega_D^{-2} = m \sum_{i=1}^K \delta_i = m \Delta_n. \quad (3)$$

Усилия в стержнях, входящие в формулу Максвелла – Мора (2), определяются методом вырезания узлов фермы. Для этого составляется система  $\mathbf{GS} = \mathbf{T}$  уравнений равновесия всех узлов в проекции на три оси координат, где  $\mathbf{s}$  — вектор неизвестных усилий и реакции опор. Все внешние нагрузки содержатся в векторе  $\mathbf{T}$  длиной  $\eta$ . Нагрузки на узел с номером  $i$ , направленные по оси  $x$ , записываются в элементы этого вектора вида:  $T_{3i-1}$ , по оси  $y$  — в элементы  $T_{3i-2}$ , по оси  $z$  — в элементы  $T_{3i}$ . Решение для усилий находится с помощью оператора обратной матрицы системы символьной математики Maple:  $\mathbf{S} = \mathbf{G}^{-1}\mathbf{T}$ . В программу вносятся координаты узлов и структура соединений стержней в узлы. Все узлы фермы и стержни нумеруются (рис. 1). Координаты узлов в выбранной системе координат имеют вид:

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i+5n+5} = b; \\ x_{i+n+1} &= x_{i+4n+4} = 0; \\ x_{i+2n+2} &= x_{i+3n+3} = -b; \\ y_i &= y_{i+j(n+1)} = ai - a; j = 0, 1, \dots, 5; \\ z_i &= 0; z_{i+3n+3} = z_{i+5n+5} = 2h; \\ z_{i+4n+4} &= 2h + h/2; z_{i+n+1} = h/2; i = 1, \dots, n + 1. \end{aligned}$$

Порядок соединений стержней в шарнирные узлы задается номерами узлов по концам стержней фермы. Стержни шести продольных ребер фермы, например, задаются списками:

$$N_{i+n(j-1)} = [i + (n+1)(j-1), i + n(j-1) + j]; \\ i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, 6.$$

Элементы матрицы  $\mathbf{G}$  системы уравнений равновесия узлов в проекциях на три оси координат — это направляющие косинусы усилий, которые вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} l_{x,i} &= (x_{N_{i,1}} - x_{N_{i,2}})/l_i; l_{y,i} = (y_{N_{i,1}} - y_{N_{i,2}})/l_i; \\ l_{z,i} &= (z_{N_{i,1}} - z_{N_{i,2}})/l_i; i = 1, \dots, \eta. \end{aligned}$$

Последовательный расчет величины  $\Delta_n$  по формуле Максвелла – Мора для различных чисел панелей  $n$  дает следующий результат:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= (312a^3 + 8c^3 + 24d^3 + 7g^3 + 584h^3 + f^3)/(16h^2EF); \\ \Delta_2 &= (4048a^3 + 48c^3 + 144d^3 + 43g^3 + 2328h^3 + 3f^3)/(32h^2EF); \\ \Delta_3 &= (3560a^3 + 24c^3 + 72d^3 + 22g^3 + 968h^3 + f^3)/(h^2EF); \\ &\dots \\ \Delta_{10} &= (984720a^3 + 880c^3 + 2640d^3 + 851g^3 + 25432h^3 + 11f^3)/(32h^2EF), \dots \end{aligned}$$

В общем случае этот коэффициент имеет вид:

$$\Delta_n = (C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 d^3 + C_4 g^3 + C_5 h^3 + C_6 f^3)/(h^2EF),$$

где средствами Maple из решения рекуррентных уравнений находятся следующие зависимости коэффициентов от числа панелей:

$$\begin{aligned} C_1 &= n(n+1)(28n^2 + 52n + 37)/12; \\ C_2 &= n(n+1)/4; \\ C_3 &= 3n(n+1)/4; C_4 = (8n^2 + 5n + 1)/32; \\ C_5 &= (24n + 49)(n+1)/4; C_6 = (n+1)/32. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, решение задачи о первой частоте по Донкерлею по формуле (3) имеет вид:

$$\omega_D = h \sqrt{\frac{EF}{m \left( C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 d^3 + C_4 g^3 + C_5 h^3 + C_6 f^3 \right)}}. \quad (5)$$

*Упрощенный метод Донкерлея.* В алгоритм метода Донкерлея можно ввести некоторое упрощение, если сумму  $\sum_{i=1}^K \delta_i$ , входящую в выражение (3), рассчитывать по среднему значению  $\delta^{\max}/2$  ее слагаемого:  $\sum_{i=1}^K \delta_i = K \delta^{\max}/2 = K \tilde{\Delta}_n$ . Эта замена связана с тем, что если при численном расчете нет проблем при вычислении суммы в выражении (3), то для аналитических преобразований могут возникнуть трудности суммирования конечного числа слагаемых. Для упрощения вычисление суммы  $\sum_{i=1}^K \delta_i$  по всем  $K$  узлам фермы заменяется половиной произведения значения максимального слагаемого на число степеней свободы  $K$ . Принимается, что максимальное вертикальное смещение приходится на узел с номером  $2n + 2$  на конце консоли (рис. 1, 2). Расчет дает следующую последовательность:

$$\begin{aligned} \tilde{\Delta}_1 &= (24a^3 + 8d^3 + f^3 + g^3 + 168h^3)/(128EFh^2); \\ \tilde{\Delta}_2 &= (112a^3 + 16d^3 + f^3 + g^3 + 232h^3)/(128EFh^2); \\ \tilde{\Delta}_3 &= (296a^3 + 24d^3 + f^3 + g^3 + 296h^3)/(128EFh^2); \\ &\dots \\ \tilde{\Delta}_{10} &= (6960a^3 + 80d^3 + f^3 + g^3 + 744h^3)/(128EFh^2) \dots \end{aligned}$$

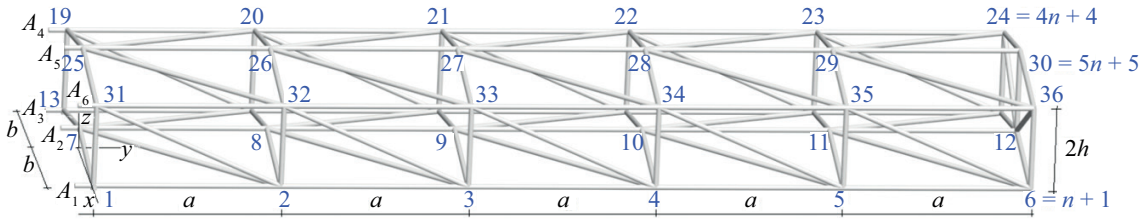


Рис. 1. Схема фермы, нумерация узлов,  $n = 5$

Fig. 1. Truss diagram, node numbering,  $n = 5$

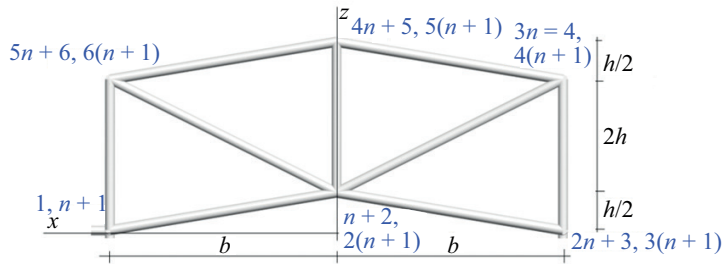


Рис. 2. Сечение консоли,  $y = nh$

Fig. 2. Console section,  $y = nh$

В общем случае для произвольного числа панелей  $n$ :

$$\tilde{\Delta}_n = (D_1 a^3 + D_2 d^3 + D_3 (f^3 + g^3) + D_4 h^3) / (h^2 EF). \quad (6)$$

Коэффициенты в этом выражении находятся методами компьютерной математики из решения рекуррентных уравнений:  $D_1 = n(2n^2 + 6n + 1)/48$ ;  $D_2 = n/16$ ;  $D_3 = 1/128$ ;  $D_4 = (8n + 13)/16$ . Решение для первой частоты приобретает вид:

$$\omega'_D = h \sqrt{\frac{EF}{mK(D_1 a^3 + D_2 d^3 + D_3 (f^3 + g^3) + D_4 h^3)}}. \quad (7)$$

Метод Рэлея. Если метод Донкерлея дает нижнюю оценку первой частоты, то верхнюю и более точную оценку дает метод Рэлея [22]. Формула для верхней оценки частоты колебаний фермы по энергетическому методу Рэлея имеет вид [23]:

$$\omega_R^2 = \sum_{i=1}^K u_i / \sum_{i=1}^K m u_i^2, \quad (8)$$

где  $u_i$  — вертикальное перемещение массы в узле с номером  $i$  при действии на узлы фермы равномерно распределенной единичной вертикальной нагрузки. Для упрощения этой формулы можно заменить сумму  $\sum_{i=1}^K u_i$  ее средним значением  $u_n^* K/2$ , где  $u_n^*$  — наибольший по всем узлам фермы прогиб от действия равномерно распределенной по всем узлам единичной нагрузки, и выполнить такую же процедуру со знаменателем (8). После упрощений формула для приближенной оценки первой частоты примет вид:

$$\omega_R^2 = 1/(m u_n^*). \quad (9)$$

Последовательный расчет  $u_n^*$  для ферм порядков 1, 2, ..., 10 дает следующие выражения:

$$u_1^* = (40a^3 + 16d^3 + g^3 + 344h^3 + f^3)/(16EFh^2);$$

$$u_2^* = (576a^3 + 96d^3 - g^3 + 1416h^3 + 3f^3)/(32EFh^2);$$

$$u_3^* = (1024a^3 + 96d^3 - g^3 + 1200h^3 + 2f^3)/(16EFh^2);$$

...

$$u_{10}^* = (133\,760a^3 + 1760d^3 - 9g^3 + 16\,456h^3 + 11f^3)/(32EFh^2), \dots$$

В общем случае для произвольного числа панелей этот коэффициент имеет вид:

$$u_n^* = (R_1 a^3 + R_2 d^3 + R_3 g^3 + R_4 h^3 + R_5 f^3)/(h^2 EF),$$

где коэффициенты находятся как решения рекуррентных уравнений:

$$R_1 = n(n+1)(7n^2 + 21n + 2)/24;$$

$$R_2 = n(n+1)/2; R_3 = (1-n)/32; \quad (10)$$

$$R_4 = (16n + 27)(n+1)/4; R_5 = n(n+1)/32.$$

Таким образом, собственная частота свободных колебаний фермы на основе измененной постановки Рэлея (9) приобретает вид:

$$\omega_R = h \sqrt{\frac{EF}{m(R_1 a^3 + R_2 d^3 + R_3 g^3 + R_4 h^3 + R_5 f^3)}}. \quad (11)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Аналитические решения (5), (7) и (11) можно сравнить с численным решением, полученным как решение задачи о наименьшем собственном значении системы с  $K$  степенями свободы. Для определения собственных частот использован опера-

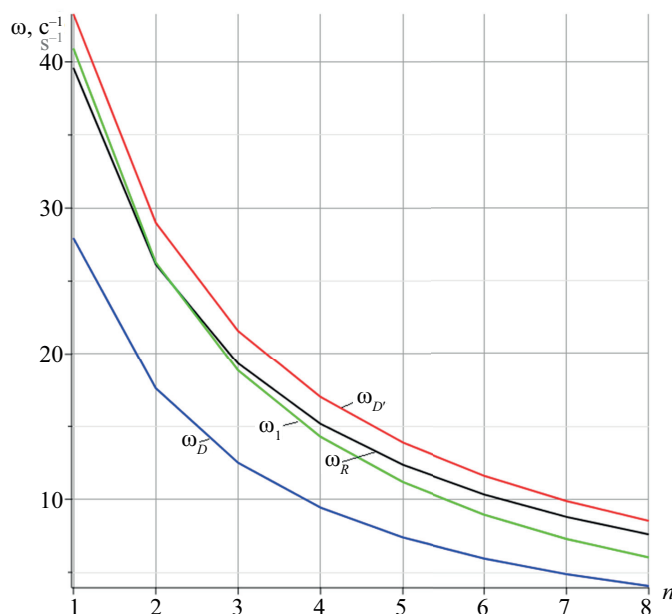


Рис. 3. Зависимость первой частоты от числа панелей, полученная разными методами  
Fig. 3. Dependence of the first frequency on the number of panels obtained by three methods

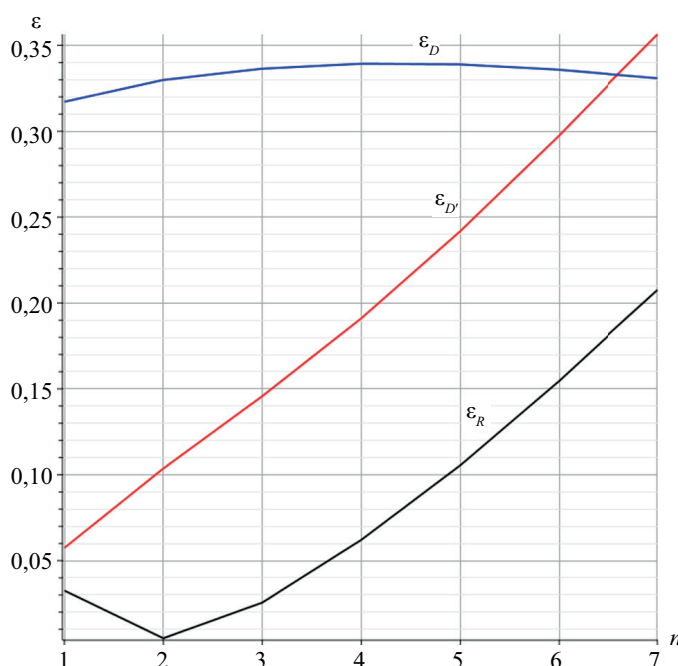


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности от числа панелей,  $a = 3$  м  
Fig. 4. Dependence of relative error on the number of panels,  $a = 3$  m

тор Eigenvalues из пакета LinearAlgebra системы Maple для вычисления собственных чисел матрицы. Для сравнения методов рассмотрены фермы из стали с модулем упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа с площадью поперечного сечения стержней  $F = 4$  см<sup>2</sup> массами узлов  $m = 400$  кг и с размером панели  $a = 2$  м. Кривая  $\omega_1$ , пересекающая кривую метода Рэлея  $\omega_R$ , на рис. 3 соответствует численному решению, полученному в системе Maple.

С увеличением числа панелей собственная частота падает. Стандартный метод Донкерля по формуле (5) дает нижнюю границу частоты и наибольшую погрешность — кривая  $\omega_D$ . Наименьшая погрешность получается у метода Рэлея по формуле (11) при небольшом числе панелей. Модифицированный метод Донкерля (7) дает несколько завышенное значение — кривая  $\omega_{D'}$ . Более точно оценить погрешности примененных методов можно по относительным величинам

$\varepsilon_D = |\omega_D - \omega_1|/\omega_1$ ;  $\varepsilon_{D'} = |\omega_{D'} - \omega_1|/\omega_1$  и  $\varepsilon_R = |\omega_R - \omega_1|/\omega_1$  (рис. 4).

С увеличением числа панелей погрешности  $\varepsilon_R$  и  $\varepsilon_{D'}$ , рассчитанные по модифицированному методу Донкерлея (7) и по решению Рэлея (11), растут.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Приближенные аналитические решения имеют смысл не только, когда они дают простое и точное решение, но и когда точность этих решений при изменении размеров конструкции не сильно меняется, или меняется как-то закономерно. В настоящем расчете замечено, что погрешность находится в разумных нормах лишь при небольшом числе панелей (рис. 4) и начинает расти уже всего при 5–7 панелях. Иная картина наблюдается у плоских ферм. В работе [7] наибольшая погрешность метода Донкерлея в задаче о частоте колебаний плоской шпренгельной ферме достигала 40 % и модифицированного метода Донкерлея — 20 %. При этом результат мало зависел

от размеров конструкции. Аналогичный результат (30 и 15 %) получен в аналогичной задаче [8] для плоской фермы с небольшим подъемом. В исследовании [9] точность методов оценивалась в задаче о колебании плоской распорной фермы. Здесь наилучшая точность 10 %, почти не меняющаяся с ростом числа панелей, достигнута для метода Рэлея в упрощенной форме. А.Н. Маслов [10] методом Рэлея в задаче о колебании простой плоской балочной фермы получил наилучшую погрешность аналитического решения всего в 1 %, и с увеличением числа панелей погрешность только падала. Несмотря на это, аналитические решения для пространственных конструкций, дающие частоту колебаний простым, а главное, альтернативным методом, могут быть полезны на практике и как проверка численного решения, и как предварительная оценка характеристик проектируемых конструкций. При этом, используя аналитические методы, следует на простых тестовых примерах оценивать погрешность решения, иногда сильно зависящую от размеров конструкции.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Borji A., Boroomand B., Movahedian B. Experimental and numerical investigations on wave propagation in planar frames and trusses with shear deformable elements: Introduction of a fast numerical method using degrees of freedom just at joints // Structures. 2024. Vol. 70. P. 107599. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107599. EDN GKXBGX.

2. Li X., Chen T., Jin D. Discrete adaptive mesh refinement for equivalence modelling of planar beamlike periodic truss with rigid joints // Thin-Walled Structures. 2025. Vol. 210. P. 112967. DOI: 10.1016/j.tws.2025.112967. EDN FGSGHV.

3. Игнатьев В.А., Игнатьев А.В. Метод конечных элементов в форме классического смешанного метода строительной механики (теория, математические модели и алгоритмы). М.: Издательство АСВ, 2022. 306 с. EDN CSOLBF.

4. Zotos K. Performance comparison of Maple and Mathematica // Applied Mathematics and Computation. 2007. Vol. 188. Issue 2. Pp. 1426–1429. DOI: 10.1016/j.amc.2006.11.008

5. Rapp B.E. Introduction to Maple // Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics. 2017. Pp. 9–20. DOI: 10.1016/b978-1-4557-3141-1.50002-2

6. Goloskokov D.P. Analyzing simply supported plates using Maple system // 2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA). 2014. Pp. 55–56. DOI: 10.1109/icctpea.2014.6893273

7. Льюнг Конг Л. Зависимость области резонансно безопасных частот от размеров статически определимой плоской фермы // Строительная меха-

ника и конструкции. 2024. № 2 (41). С. 16–26. DOI: 10.36622/2219-1038.2024.41.2.002. EDN AKAVDU.

8. Luong C.L. Resonance safety zones of a truss structure with an arbitrary number of panels // Construction of Unique Buildings and Structures. 2024. Vol. 113. Issue 4. P. 11304. DOI: 10.4123/CUBS.113.4. EDN FLBVJY.

9. Луан Л.К. Оценки прогиба и частоты собственных колебаний шарнирно-стержневой рамы с произвольным числом панелей // Строительная механика и конструкции. 2024. № 4 (43). С. 42–53. DOI: 10.36622/2219-1038.2024.43.4.004. EDN MGQUXN.

10. Maslov A. The first natural frequency of a planar regular truss. Analytical solution // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. Vol. 109. Issue 4. P. 10912. DOI: 10.4123/CUBS.109.12. EDN QNZNZW.

11. Комерзан Е.В., Маслов А.Н. Аналитическая оценка основной частоты собственных колебаний регулярной фермы // Строительная механика и конструкции. 2023. № 2 (37). С. 17–26. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.002. EDN GMNMJQ.

12. Комерзан Е.В., Маслов А.Н. Оценка основной частоты колебаний Г-образной пространственной фермы // Строительная механика и конструкции. 2023. № 2 (37). С. 35–45. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.004. EDN UGWBIP.

13. Sviridenko O.V., Komerzan E.V. The dependence of the natural oscillation frequency of the console truss on the number of panels // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. Vol. 101. Issue 3. P. 10101. DOI: 10.4123/CUBS.101.1. EDN CKQDPU.

14. Комерзан Е.В., Свириденко О.В. Статические деформации фермы составной пространствен-

ной рамы. Аналитические решения // Строительная механика и конструкции. 2022. № 4 (35). С. 40–48. DOI: 10.36622/VSTU.2022.35.4.005. EDN NCYGXE.

15. Астахов С.В. Аналитическая оценка прогиба стержневой модели каркаса четырехскатного покрытия // Строительная механика и конструкции. 2024. № 4 (43). С. 34–41. DOI: 10.36622/2219-1038.2024.43.4.003. EDN GITKYF.

16. Kirsanov M.N. Model of a hexagonal prismatic truss. Oscillation frequency spectrum // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. Vol. 106. Issue 1. P. 10601. DOI: 10.4123/CUBS.106.1. EDN IPEVXJ.

17. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids — the hunt for statically determinate periodic trusses // ZAMM — Journal of Applied Mathematics and Mechanics. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. 2005. Vol. 85. Issue 9. Pp. 607–617. DOI: 10.1002/zamm.200410208

18. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2006. Vol. 54. Issue 4. Pp. 756–782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008

19. Галишикова В.В., Игнатъев В.А. Регулярные стержневые системы: теория и методы расчета. Волгоград: ВолгГАСУ, 2006. EDN QNMMHT.

20. Kaveh A., Hosseini S.M., Zaerreza A. Size, Layout, and Topology Optimization of Skeletal Structures Using Plasma Generation Optimization // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2021. Vol. 45. Issue 2. Pp. 513–543. DOI: 10.1007/s40996-020-00527-1

21. Kaveh A. Optimal analysis of structures by concepts of symmetry and regularity. 2013. DOI: 10.1007/978-3-7091-1565-7

22. Кирсанов М.Н. Метод энергетической коллокации для оценки основной частоты собственных колебаний фермы // Строительная механика и конструкции. 2023. № 1 (36). С. 27–37. DOI: 10.36622/VSTU.2023.36.1.003. EDN UODTDL.

23. Vorobev O. Bilateral analytical estimation of the first frequency of a plane truss // Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. Vol. 92. Issue 7. P. 9204. DOI: 10.18720/CUBS.92.4. EDN ODWWBN.

Поступила в редакцию 15 июня 2025 г.

Принята в доработанном виде 17 июня 2025 г.

Одобрена для публикации 21 января 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Михаил Николаевич Кирсанов** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин; **Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»);** 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; SPIN-код: 8679-6853, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, Google Scholar: FfoNGFWAAAAJ, IstiniaResearcherID: 2939132; C216@ya.ru.

## REFERENCES

1. Borji A., Boroomand B., Movahedian B. Experimental and numerical investigations on wave propagation in planar frames and trusses with shear deformable elements: Introduction of a fast numerical method using degrees of freedom just at joints. *Structures*. 2024; 70:107599. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107599. EDN GKXBGX.

2. Li X., Chen T., Jin D. Discrete adaptive mesh refinement for equivalence modelling of planar beamlike periodic truss with rigid joints. *Thin-Walled Structures*. 2025; 210:112967. DOI: 10.1016/j.tws.2025.112967. EDN FGSGHV.

3. Ignatiev V.A., Ignatiev A.V. *Finite element method in the form of the classical mixed method of structural mechanics (theory, mathematical models and algorithms)*. Moscow, ASV Publishing House, 2022; 306. EDN CSOLBF. (rus.).

4. Zotos K. Performance comparison of Maple and Mathematica. *Applied Mathematics and Computation*. 2007; 188(2):1426-1429. DOI: 10.1016/j.amc.2006.11.008

5. Rapp B.E. Introduction to Maple. *Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics*. 2017; 9-20. DOI: 10.1016/b978-1-4557-3141-1.50002-2

6. Goloskokov D.P. Analyzing simply supported plates using Maple system. *2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA)*. 2014; 55-56. DOI: 10.1109/icctpea.2014.6893273

7. Luong Cong L. Dependence of the region of resonance-safe frequencies on the sizes of statically determinable flat truss. *Structural Mechanics and Structures*. 2024; 2(41):16-26. DOI: 10.36622/2219-1038.2024.41.2.002. EDN AKAVDU. (rus.).

8. Luong C.L. Resonance safety zones of a truss structure with an arbitrary number of panels. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2024; 113(4):11304. DOI: 10.4123/CUBS.113.4. EDN FLBVJY.

9. Luan L.C. Estimates of deflection and natural frequency of vibrations of a hinged-rod truss with an arbitrary number of panels. *Structural Mechanics and*

*Structures*. 2024; 4(43):42-53. DOI: 10.36622/2219-1038.2024.43.4.004. EDN MGQUXN. (rus.).

10. Maslov A. The first natural frequency of a planar regular truss. Analytical solution. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023; 109(4):10912. DOI: 10.4123/CUBS.109.12. EDN QNZNZW.

11. Komerzan E.V., Maslov A.N. Analytical evaluation of a regular truss natural oscillations fundamental frequency. *Structural Mechanics and Structures*. 2023; 2(37):17-26. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.002. EDN GMNMJQ. (rus.).

12. Komerzan E.V., Maslov A.N. Estimation of the l-shaped spatial truss fundamental frequency oscillations. *Structural Mechanics and Structures*. 2023; 2(37):35-45. DOI: 10.36622/VSTU.2023.37.2.004. EDN UGWBIP. (rus.).

13. Sviridenko O.V., Komerzan E.V. The dependence of the natural oscillation frequency of the console truss on the number of panels. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022; 101(3):10101. DOI: 10.4123/CUBS.101.1. EDN CKQDPU.

14. Komerzan E.V., Sviridenko O.V. Static deformations of the truss of a composite spatial frame. Analytical solutions. *Structural Mechanics and Structures*. 2022; 4(35):40-48. DOI: 10.36622/VSTU.2022.35.4.005. EDN NCYGXE. (rus.).

15. Astakhov S.V. Analytical assessment of the deflection of the rod model of a four-slope roof frame. *Structural Mechanics and Structures*. 2024; 4(43):34-41. DOI: 10.36622/2219-1038.2024.43.4.003. EDN GITKYF. (rus.).

16. Kirsanov M.N. Model of a hexagonal prismatic truss. Oscillation frequency spectrum. *Construction*

*of Unique Buildings and Structures*. 2023; 106(1):10601. DOI: 10.4123/CUBS.106.1. EDN IPEVXJ.

17. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids — the hunt for statically determinate periodic trusses. *ZAMM — Journal of Applied Mathematics and Mechanics. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 2005; 85(9):607-617. DOI: 10.1002/zamm.200410208

18. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2006; 54(4):756-782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008

19. Galishnikova V.V., Ignatiev V.A. *Regular rod systems: theory and calculation methods*. Volgograd, VolgGASU, 2006. EDN QNMMHT. (rus.).

20. Kaveh A., Hosseini S.M., Zaerrega A. Size, Layout, and Topology Optimization of Skeletal Structures Using Plasma Generation Optimization. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2021; 45(2):513-543. DOI: 10.1007/s40996-020-00527-1

21. Kaveh A. *Optimal analysis of structures by concepts of symmetry and regularity*. 2013. DOI: 10.1007/978-3-7091-1565-7

22. Kirsanov M.N. Energy collocation method for the truss fundamental frequency estimation. *Structural Mechanics and Structures*. 2023; 1(36):27-37. DOI: 10.36622/VSTU.2023.36.1.003. EDN UODTDL. (rus.).

23. Vorobev O. Bilateral analytical estimation of the first frequency of a plane truss. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020; 92(7):9204. DOI: 10.18720/CUBS.92.4. EDN ODWWBN.

Received June 15, 2025.

Adopted in revised form on June 17, 2025.

Approved for publication on January 21, 2026.

**B I O N O T E S:** **Mikhail N. Kirsanov** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; SPIN-code: 8679-6853, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, Google Scholar: FfoNGFwAAAAJ, IstinaresearcherID: 2939132; C216@ya.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 692.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.323-332

## Анализ результатов испытаний забивных свай статической нагрузкой

Дмитрий Андреевич Беркаусов, Александр Леонидович Невзоров  
*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ);  
г. Архангельск, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В последнее время из-за увеличивающейся этажности зданий все чаще применяются свайные фундаменты. При их проектировании важно правильно определить несущую способность свай, чтобы максимально эффективно использовать материально-технические ресурсы. Самые надежные результаты, конечно, дают испытания статической нагрузкой, поэтому крупные застройщики г. Архангельска применяют этот метод на всех объектах с числом этажей 9 и более. К сожалению, во многих случаях испытания прекращают при достижении требуемой нагрузки при небольших осадках, что не позволяет найти фактическое сопротивление сваи.

**Материалы и методы.** Приводятся результаты анализа испытаний 15 свай статической нагрузкой. Сваи опирались на морские суглинки в твердом или полутвердом состоянии с коэффициентом пористости 0,49–0,61, углом внутреннего трения 23–27°, удельным сцеплением 40–75 кПа и модулем деформации 25–32 МПа. Напластование вышележащих грунтов на площадках строительства было примерно одинаковым. Обработка результатов испытаний велась с помощью метода F.K. Chin.

**Результаты.** Получены значения предельной нагрузки на каждую сваю, а также даны предложения об оценке несущей способности свай, не достигших предельной осадки.

**Выводы.** Установлено, что для определения предельной нагрузки на сваю достаточно нагружать ее только в пределах зоны упругих деформаций, а дальнейшее ее поведение прогнозировать с помощью эмпирических зависимостей, сокращая тем самым время испытаний. Получено отношение предельных нагрузок к действующим в проектируемых зданиях расчетным нагрузкам. Сделан вывод о том, что в ряде случаев длина свай была задана избыточной.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** висячая свая, глинистые грунты, статические испытания свай, осадка, несущая способность свай, предельное сопротивление

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Беркаусов Д.А., Невзоров А.Л. Анализ результатов испытаний забивных свай статической нагрузкой // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 3. С. 323–332. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.323-332

*Автор, ответственный за переписку:* Дмитрий Андреевич Беркаусов, berkausov.d@gmail.com.

## The analysis of static load tests results of driven piles

Dmitry A. Berkausov, Alexander L. Nevzorov

*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU); Arkhangelsk, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** Last decades, piles foundations become more popular because of increasing height of buildings. It is necessary to determinate bearing capacity of pile while designing to reach the most efficient way for spending material and technical resources. The safest results can be received from static load tests, that's why big developer companies in Arkhangelsk-city included this method for all buildings with nine or more floors. Unfortunately, there are a lot of tests that ended when the needed load is reached with small settlement, and the actual value of pile resistance can't be found.

**Materials and methods.** In this paper, the analyzed results of static load test for 15 piles are presented. All of them were driven into marine clayey soils in solid or semi-solid state with a porosity coefficient of 0.49–0.61, an internal friction angle of 23–27°, a specific adhesion of 40–75 kPa and a deformation modulus of 25–32 MPa, layers above were close to each other on all construction sites. Processing the results were made by F.K. Chin method.

**Results.** We reached the ultimate load for every pile, also the proposals to estimate the bearing capacity of piles which didn't reach the ultimate settlement were made.

**Conclusions.** Finally, it was determined, that the ultimate load can be evaluated if only loaded it within the range of elastic deformation and after that range you can predict the way of chart with empirical relation for reduce the test time. The relation between ultimate loads and actual loads in the buildings was found for two groups of piles. Also, was made the conclusion about the excessive length of piles.

**KEYWORDS:** friction pile, clayey soils, static load tests, settlement, pile bearing capacity, ultimate resistance

**FOR CITATION:** Berkausov D.A., Nevzorov A.L. The analysis of static load tests results of driven piles. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(3):323-332. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.323-332 (rus.).

*Corresponding author:* Dmitry A. Berkausov, berkausov.d@gmail.com.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия из-за увеличения этажности строящихся зданий, а следовательно, и роста нагрузок, все чаще применяются свайные фундаменты. Они позволяют возводить здания в различных, иногда крайне неблагоприятных, инженерно-геологических условиях. При этом застройщики, стремясь повысить эффективность строительства, требуют обоснования несущей способности свай и повышения достоверности ее определения [1]. Из существующих методов определения этой величины, часто дающих отличные друг от друга результаты, самый надежный — испытания статической нагрузкой [2].

При испытаниях по методике ГОСТ 5686–2020 нагрузка на висячую сваю должна увеличиться до тех пор, пока ее осадка не достигнет 40 мм или не произойдет «срыв» сваи [3]. Тем не менее во многих случаях испытания завершают при достижении установленной техническим заданием нагрузки, когда несущая способность сваи еще не достигнута. Такие ситуации в г. Архангельске возникают, в частности, при испытаниях свай большой длины, опирающихся на морские суглинки или пески, отличающиеся высокими деформационно-прочностными характеристиками. В результате в проект закладываются сваи, обладающие довольно большим запасом несущей способности и испытывающие под нагрузкой от здания в основном упругие деформации.

Для оценки эффективности использования свайных фундаментов авторами выполнен анализ результатов испытаний двух групп свай. В первую группу вошли сваи, доведенные до осадки 40 мм и более,

во вторую — сваи, испытания которых прекращены при достижении установленной программой испытаний нагрузки. Число свай в первой группе оказалось равным 9, во вторую группу вошло 6 свай.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Все сваи имели длину от 14 до 19 м, сечение  $35 \times 35$  см и были изготовлены из бетона класса В30. По приложению Г СП 22.13330.2016 предельное значение осадки для жилых домов принято 200 мм. В этом случае, согласно СП 24.13330, предельная нагрузка на сваю определяется при осадке  $S = 0,2 \cdot 200 = 40$  мм.

Сваи опирались на морские суглинки со следующими свойствами: коэффициент пористости  $e = 0,49–0,61$ , показатель текучести  $I_L = (-0,18)–(+0,13)$ , угол внутреннего трения  $\varphi = 23–27^\circ$ , удельное сцепление  $c = 40–75$  кПа, модуль деформации  $E = 25–32$  МПа.

Напластование вышележащих грунтов на площадках строительства примерно одинаковое — суглинки различной консистенции, в некоторых местах с включениями торфа и ила, толщиной от 2 до 5 м. В связи с варьированием деформационно-прочностных характеристик несущего слоя в узких интервалах рассматривалась общая совокупность свай, а их испытания, согласно ГОСТ 5686–2020, являются сопоставимыми.

Вертикальная нагрузка на сваи создавалась при помощи гидравлического домкрата с максимальным усилием 2000 кН (ДГ200-П150, 100 МПа, диаметр 190 мм, площадь поршня 283,4 см<sup>2</sup>) и насоса с ручным приводом НРГ-7080. Упором служила балочная конструкция

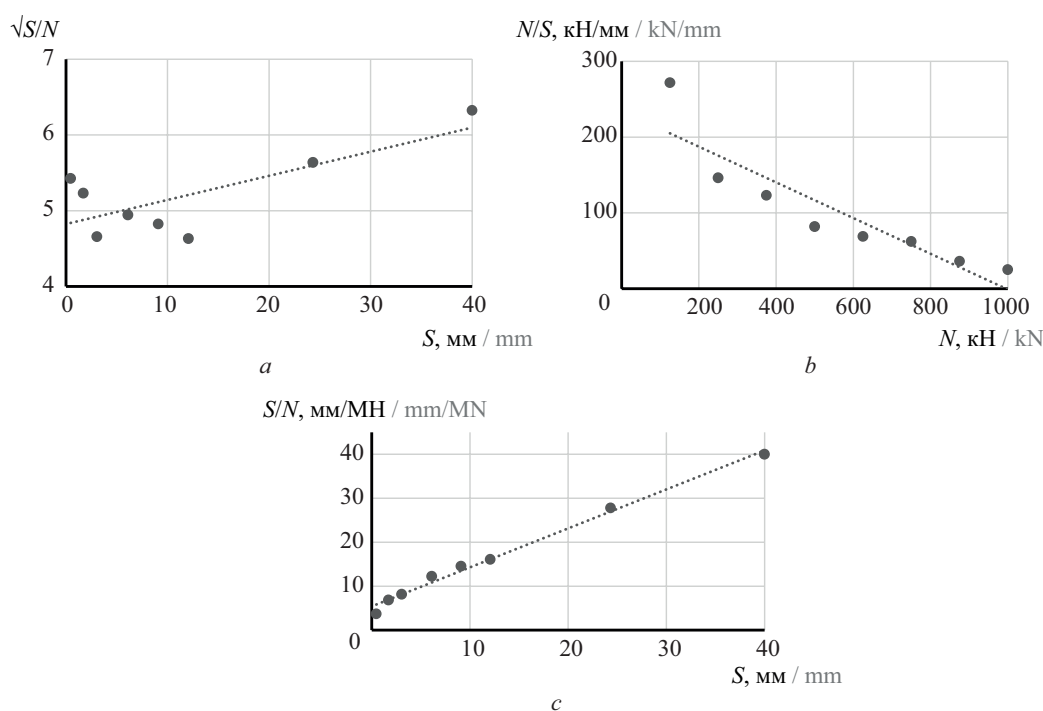


Рис. 1. Обработка данных испытаний сваи № 1 методами: *a* — P. Brinch-Hansen; *b* — L. Decourt; *c* — F.K. Chin

Fig. 1. Processing data test of pile No. 1 by methods: *a* — P. Brinch-Hansen; *b* — L. Decourt; *c* — F.K. Chin

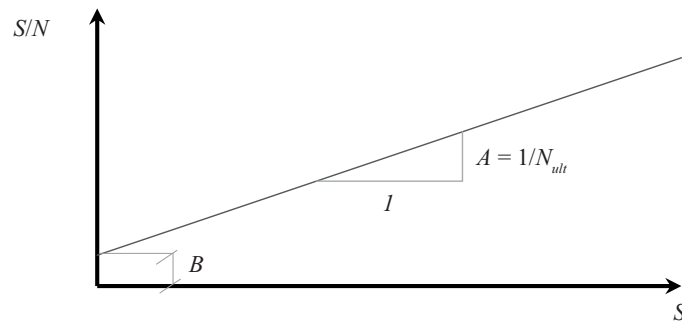


Рис. 2. Параметры зависимости  $S/N = f(S)$

Fig. 2. Parameters of function  $S/N = f(S)$

с пригрузом из сборного железобетона общей массой, соответствующей требуемому значению нагрузки.

Необходимо уточнить, что в проектах несущая способность свай по материалу принималась равной 1600 кН. Расчетный метод дал несущую способность свай в пределах от 1617 до 1987 кН. Динамические испытания, в том числе после отдыха, не проводились, отказ определялся по журналам погружения на последних 10 см забивки. Заметим, что все рассматриваемые сваи по условию взаимодействия с грунтом не относятся к сваям-стойкам, так как опираются на грунты с модулем деформации менее 50 МПа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обычно график зависимости осадки свай от нагрузки  $S = f(N)$  имеет форму гиперболы, к которой для всего интервала нагрузки весьма сложно подобрать эмпирическую зависимость. В данной работе первоначально рассматривались методы обработки результатов испытаний, предложенных Р. Brinch-Hansen, L. Decourt и Ф.К. Chin с соавт. [4–14].

В каждом из указанных методов график зависимости  $S = f(N)$  перестраивается в других координатных осях для получения линейной зависимости. В методе Р. Brinch-Hansen по оси абсцисс откладывают осадку  $S$ , по оси ординат —  $\sqrt{S/N}$ . В методе L. Decourt по оси абсцисс — нагрузку  $N$ , по оси ординат — отношение  $N/S$ . В методе Ф.К. Chin по оси абсцисс —  $S$ , по оси ординат — отношение  $S/N$ .

В качестве примера на рис. 1 представлены графики, полученные при обработке результатов испытаний сваи № 1. Как видно, метод Ф.К. Chin дал наилучший результат — экспериментальные данные с наименьшей погрешностью аппроксимируются линейной зависимостью [15].

При обработке данных по методу Ф.К. Chin получили линейную зависимость (рис. 2):

$$S/N = AS + B,$$

где  $A$  — коэффициент, численно равный обратному значению предельной нагрузки,  $A = 1/N_{ult}$ ;  $B$  — коэффициент, характеризующий поведение графика в зоне упругих деформаций.

При обработке результатов статических испытаний было выявлено, что эмпирические зависимости

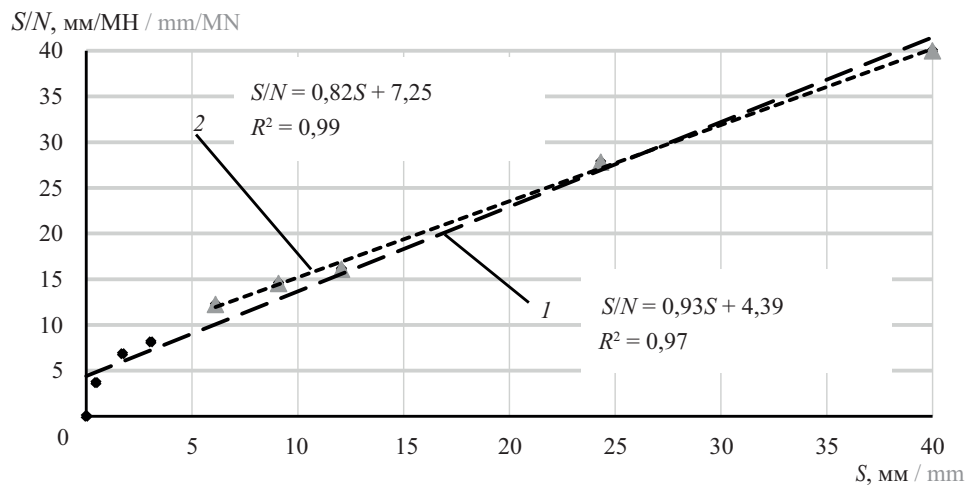


Рис. 3. Линейная аппроксимация при обработке экспериментальных данных для сваи № 1 по методу Ф.К. Chin: 1 — линия тренда для всей совокупности данных; 2 — линия тренда для осадки свай более 5 мм

Fig. 3. Linear approximation in the processing of experimental data for pile No. 1 using the F.K. Chin method: 1 — the trend line for entire data; 2 — the trend line for settlement over 5 mm

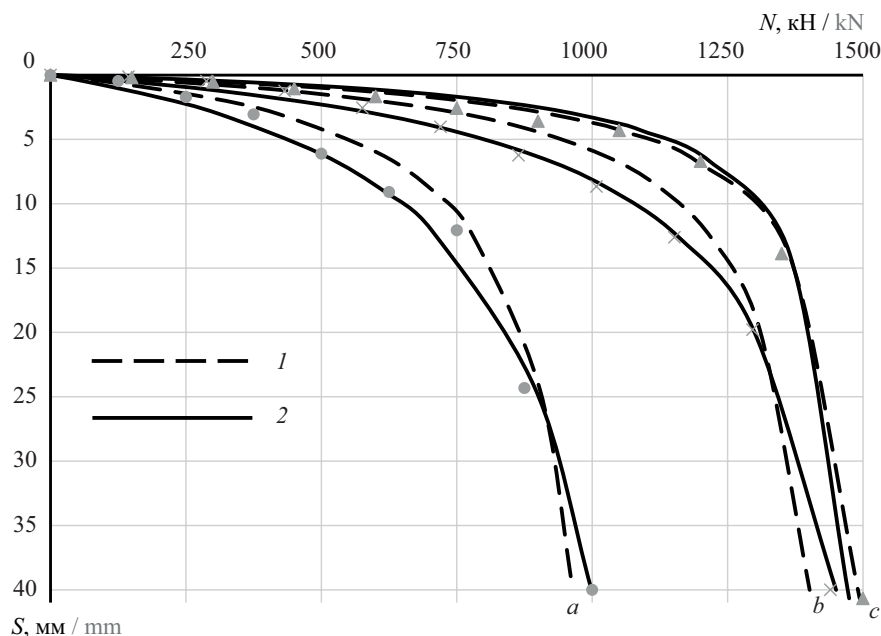


Рис. 4. Эмпирические зависимости  $S = f(N)$ :  $a$  — свая № 1;  $b$  — свая № 3;  $c$  — свая № 8; 1 — при учете всей совокупности экспериментальных значений; 2 — при учете значений с осадкой более 5 мм

Fig. 4. Empirical functions  $S = f(N)$ :  $a$  — pile No. 1;  $b$  — pile No. 3;  $c$  — pile No. 8; 1 — for all experimental data; 2 — for settlement over 5 mm

сти точнее отображают экспериментальные данные после исключения из рассмотрения точек с осадкой сваи 5 мм и менее (рис. 3). Коэффициент детерминации  $R^2$  в этом случае достигает значений, близких к единице (рис. 4).

На рис. 4 видно, что, исключая первые экспериментальные точки при линейной аппроксимации, можно добиться максимального совпадения расчетных и экспериментальных значений осадки сваи [16]. Такая процедура была проведена для всех девяти свай первой группы, результаты расчетов приведены в табл. 1. В последней графе табл. 1 показано отношение предельной нагрузки  $N_{ult}$  к значению предельного сопротивления сваи  $F_d$ , принятого согласно ГОСТ 5686–2020 при осадке 40 мм.

Следующим шагом стала обработка результатов испытаний второй группы свай, для которых не было достигнуто предельное значение осадки, т.е. свай, нагруженных лишь до заданного проектной организацией значения нагрузки.

Линию тренда, как и для свай первой группы, строили, исключая точки с осадкой 5 мм и менее. Далее получали значения параметров  $A$  и  $B$  и строили графики  $S = f(N)$  вплоть до предельной осадки сваи 40 мм. В качестве примера на рис. 5 приведен график зависимости  $S = f(N)$  для сваи № 11. На рис. 5 обозначено:  $S^*$  — осадка, достигнутая при испытаниях сваи (под нагрузкой  $F_d$ );  $S_{max}$  — предельная осадка сваи при испытаниях по ГОСТ 5686–2020,  $S_{max} = 40$  мм;  $F_d$  — принятое значение предельного сопротивления сваи;  $N_{max}$  — полученное экстраполяцией значение нагруз-

ки при осадке сваи  $S_{max}$ ;  $N_{ult}$  — найденное по методу Ф.К. Чин предельное сопротивление сваи.

Результаты испытаний свай второй группы, а также значения указанных выше параметров приведены в табл. 2.

Для свай первой группы, т.е. свай, при испытании которых была достигнута осадка  $S_{max} = 40$  мм, отношение найденного по методу Ф.К. Чин предельного сопротивления сваи  $N_{ult}$  к принятому значению предельного сопротивления  $F_d$  варьирует в весьма узком интервале — от 1,14 до 1,47 и в среднем составляет 1,27. То есть для всех свай рассматриваемой группы в проекты закладывался примерно одинаковый запас по несущей способности. С учетом того, что допустимую нагрузку на сваю находят делением  $F_d$  на коэффициент надежности по грунту, равный 1,2, отношение  $N_{ult}$  к расчетным нагрузкам, действующим на сваи в проектируемых зданиях, составляет в среднем  $1,2 \cdot 1,27 = 1,52$ .

Для свай второй группы нагрузка  $N_{max}$ , требуемая для достижения осадки  $S_{max}$ , определялась путем экстраполяции эмпирических зависимостей. Отношение  $N_{ult}/N_{max}$  изменяется от 1,07 до 1,27 и в среднем составляет 1,17, что несколько меньше аналогичного показателя для свай первой группы. В связи с тем, что, принимая во внимание прочность ствола свай, в проекты закладывали несущую способность  $F_d \leq 1500$  кН, отношение  $N_{ult}/F_d$  для рассматриваемой группы свай оказалось существенно выше — от 1,31 до 2,02 при среднем значении 1,63. Отношение  $N_{ult}$  к действующим на сваи расчетным нагрузкам составляет в среднем  $1,2 \cdot 1,63 = 1,96$ . Столь существенный

Табл. 1. Результаты испытаний первой группы свай  
Table 1. Test results for first group of piles

Номер свай Pile number	Свойства несущего слоя Characteristics of the bearing layer					Длина свай, м Pile length, m	Заглубление в несущий слой, м Penetration into the bearing layer, m	Отказ на последних 10 см, мм Pile refusal at the last 10 cm, mm	Продолжительность «отдыха» свай, сут Pile rest period, days	$S_{\max}$ , мм mm	$F_{sp}$ , кН kN	A, 1/МН 1/MN	B, мм/МН mm/MN	$N_{ult} = 1/A,$ кН / kN	$N_{ult}/F_d$
	e	$I_L$	$\varphi$ , град degree	c, кПа kPa	E, МПа MPa										
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
1	0,558	-0,07	26	75	32	17	1,28	0,17	37	40,0	875	0,82	7,25	1219	1,39
2	0,538	-0,12	25	72	32	17	1,34	0,17	35	40,0	1000	0,68	8,20	1470	1,47
3	0,611	0,08	25	53	27	14	2,10	0,44	25	40,7	1350	0,65	1,15	1538	1,14
4	0,580	0,02	25	53	27	14	2,05	1,25	34	40,2	1200	0,68	2,60	1470	1,23
5	0,604	0,10	25	53	27	13,5	2,25	1,11	27	40,6	1050	0,80	1,54	1250	1,19
9	0,550	0,03	25	53	27	15,5	2,35	1,11	36	40,8	1050	0,78	2,32	1281	1,22
7	0,486	-0,18	23	40	28	18	1,01	0,56	18	40,8	864	0,90	3,95	1111	1,29
8	0,548	0,13	24	39	25	18	0,58	1,11	14	40,0	1296	0,61	3,18	1639	1,26
9	0,490	-0,11	27	52	32	16	1,38	1,11	23	40,4	1050	0,79	1,60	1265	1,21
Среднее / Average															1,27

Табл. 2. Результаты испытаний второй группы свай  
 Table 2. Test results for second group of piles

Номер свай Pile number	Свойства несущего слоя Characteristics of the bearing layer					Длина свай, м Pile length, m	Заглу- бление в несущий слой, м Penetra- tion into the bearing layer, m	Отказ на по- следних 10 см, мм Pile re- fusals at the last 10 cm, mm	Продол- житель- ность «отдыха» свай, сут Pile rest period, days	$S_{max}$ , мм mm	$F_{sp}$ кН kN	A, 1/МН 1/MN	B, мм/МН mm/MN	$N_{max}$ , кН / kN	$N_{ult} = 1/4 \cdot N_{max}$ кН / kN	$N_{ult}/N_{max}$	$N_{ult}/F_d$
	e	$I_L$	φ, град degree	c, кПа kPa	E, МПа MPa												
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)
10	0,557	-0,18	23	71	30	17	2,21	0,53	35	9,7	1500	0,33	3,20	2439	3030	1,24	2,02
11	0,486	-0,18	23	40	28	18	0,82	-	14	14,5	1440	0,40	4,30	1970	2500	1,27	1,74
12	0,578	0,13	23	40	28	19	1,25	-	14	28,7	1440	0,53	4,80	1538	1887	1,23	1,31
13	0,552	-0,03	25	72	32	17	2,32	0,18	28	6,9	1500	0,47	1,35	1985	2128	1,07	1,42
14	0,540	-0,12	23	55	30	16	1,23	1,00	21	9,0	1500	0,45	2,00	2000	2222	1,11	1,48
15	0,511	-0,18	25	54	28	16	1,10	0,91	27	6,3	1500	0,37	1,60	2439	2703	1,11	1,80
Среднее / Average																	
																1,17	1,63

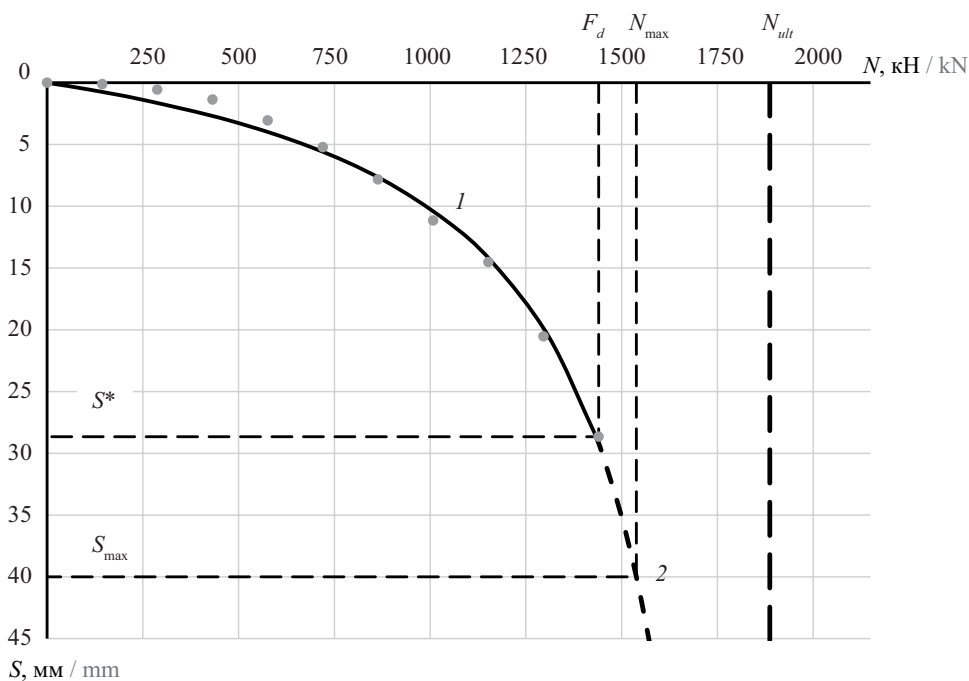


Рис. 5. Зависимость  $S = f(N)$  сваи № 11: 1 — экспериментальная зависимость; 2 — экстраполяция экспериментальной зависимости

Fig. 5. Function  $S = f(N)$  for pile No. 11: 1 — experimental function; 2 — extrapolation of experimental function

запас показывает, что сваи второй группы имели избыточную длину.

Получить корреляционные зависимости коэффициентов  $A$  и  $B$  от деформационных или прочностных характеристик грунтов, величины заглубления в несущий слой, отказов и продолжительности «отдыха» не удалось из-за узких интервалов варьирования указанных величин.

Полученные результаты могут применяться для оценки достоверности проводимых статических испытаний свай и эффективности принимаемых проектных решений свайных фундаментов зданий [17]. По мере накопления данных могут быть составлены региональные таблицы параметров эмпирических зависимостей  $S = f(N)$  как функции прочностных или физических свойств грунтов, отказов свай при динамических испытаниях и т.п., что позволит сократить объем и продолжительность статических испытаний [18–20].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов испытаний 15 забивных свай статической нагрузкой показал, что для построения эмпирических зависимостей осадки от нагрузки может применяться метод Ф.К. Чин. Причем, ис-

ключая из рассмотрения экспериментальные точки с осадкой менее 5 мм, где грунт испытывает только упругие деформации, можно добиться близких к единице значений коэффициента детерминации  $R^2$ .

Для свай первой группы, т.е. свай, при испытании которых была достигнута осадка  $S_{\max} = 40$  мм, отношение найденного по методу Ф.К. Чин предельного сопротивления сваи  $N_{ult}$  к принятому значению предельного сопротивления  $F_d$  варьирует в весьма узком интервале — от 1,14 до 1,47 и в среднем составляет 1,27. Отношение предельных нагрузок  $N_{ult}$  к действующим в проектируемых зданиях расчетным нагрузкам составляет в среднем 1,52.

Для свай второй группы нагрузка  $N_{\max}$ , требуемая для достижения осадки  $S_{\max} = 40$  мм, определялась путем экстраполяции эмпирических зависимостей. Отношение  $N_{ult}/N_{\max}$  изменяется от 1,07 до 1,27 и в среднем составляет 1,17, что несколько меньше аналогичного показателя для свай первой группы. В связи с тем, что, принимая во внимание прочность ствола свай, в проекты закладывали несущую способность  $F_d \leq 1500$  кН, отношение  $N_{ult}/F_d$  составило в среднем 1,63, а отношение  $N_{ult}$  к действующим на сваи расчетным нагрузкам — 1,96, что говорит об избыточной длине свай.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов. М. : Стройиздат, 1994. 380 с.

2. Гаврилов П.К., Глухов В.С. Оценка несущей способности свай при испытании статической нагрузкой // Строительство и архитектура. 2020. Т. 8.

№ 4. С. 22–27. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-4-22-27. EDN PVQHOH.

3. *Гольдфельд И.З.* Долевая работа вертикально нагруженной сваи при статических испытаниях грунтов // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : мат. докл. IV Общероссийской науч.-практ. конф. и выставки изыскательских организаций. 2018. С. 469–481. EDN YZVZPV.

4. *Hansen J.B.* Discussion of “Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils” // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1963. Vol. 89. Issue 4. Pp. 241–242. DOI: 10.1061/jsfeaq.0000542

5. *Chin F.K.* Estimation of the Ultimate Load of Piles Not Carried to Failure // Proceedings of the Second Southeast Asian Conference on Soil Engineering. 1970. Pp. 81–90.

6. *Decourt L.* Behavior of foundations under working load conditions // Proceedings of the 11th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 1999. Vol. 4. Pp. 453–488.

7. *Davisson M.T.* High capacity piles // Proceedings of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction. American Society of Civil Engineers. 1972. Pp. 81–112.

8. *Fellenius B.H.* What capacity value to choose from the results a static loading test. We have determined the capacity, then what? // Deep Foundation Institute, Fulcrum Winter. 2001. Pp. 19–26.

9. *Olgun M., Yenginar Y., Hanati A.* Interpreting Load-Settlement Curves of Pile Foundations by Graphical Methods // 3rd International Soil-Structure Interaction Symposium. 2017.

10. *Adel R., Shakir R.R.* Evaluation of Static Pile Load Test Results of Ultimate Bearing Capacity by Interpreting Methods // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 961. Issue 1. P. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/961/1/012013

11. *Birid K.C.* Evaluation of Ultimate Pile Compression Capacity from Static Pile Load Test Results // 1st GeoMEast International Congress and Exhibition. 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-61642-1\_1

12. *Dalerci G., Bovolenta R.* A New Method for the Evaluation of the Ultimate Load of Piles by Tests

not Carried to Failure // Geotechnical and Geological Engineering. 2014. Vol. 32. Issue 6. Pp. 1415–1426. DOI: 10.1007/s10706-013-9673-z

13. *Dey S.K., Ansary M.A.* Evaluation of pile capacity estimation methods in Bangladesh: A comparative study using static analysis and load tests // International Journal of Science and Research Archive. 2025. Vol. 15. Issue 3. Pp. 1306–1313. DOI: 10.30574/ijra.2025.15.3.1861

14. *Mishra A., Sawant V.A., Deshmukh V.B.* Prediction of pile capacity of socketed piles using different approaches // Geotechnical and Geological Engineering. 2019. Vol. 37. Issue 6. Pp. 5219–5230. DOI: 10.1007/s10706-019-00976-0

15. *Fellenius B.H.* The analysis of results from routine pile load tests // Ground Engineering. 2005. Pp. 21–29.

16. *Meyer Z., Stachecki K.* Static load test curve (Q–s) conversion in to pile of different size // Annals of Warsaw University of Life Sciences — SGGW. Land Reclamation. 2018. Vol. 50. Issue 2. Pp. 171–182. DOI: 10.2478/ssggw-2018-0014

17. *Шмидт О.А.* Совершенствование методики определения несущей способности сваи по результатам статистических испытаний // Современное оборудование, методы инструментального обследования и усиления зданий и сооружений : сб. науч. ст. по мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 80–87. EDN ZZFBYL.

18. *Тер-Мартirosян З.Г., Филиппов К.А.* Решение задачи осадки сваи под действием вертикальной статической нагрузки с учетом пластических свойств грунтов основания // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 7. С. 871–881. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.871-881. EDN DFGSWY.

19. *Ahmed Z., Hore S., Ansary M., Hore R., Ansary M.A.* Comparative Evaluation of Pile Load Capacity Using Static and Dynamic Test // Geotechnical and Geological Engineering. 2025. Vol. 43. Issue 6. DOI: 10.1007/s10706-025-03205-z

20. *Cuajao V.C.S.* Comparison of static and dynamic load testing : a review // International Journal of GEOMATE. 2024. Vol. 27. Issue 121. DOI: 10.21660/2024.121.g13441

Поступила в редакцию 1 июля 2025 г.

Принята в доработанном виде 19 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 30 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Дмитрий Андреевич Беркаусов** — аспирант; **Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ)**; 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; berkausov.d@gmail.com;

**Александр Леонидович Невзоров** — доктор технических наук, профессор; **Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ)**; 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; РИНЦ ID: 393637, Scopus: 7004203097, ResearcherID: J-2809-2012, ORCID: 0000-0002-6547-2741; a.l.nevzorov@yandex.ru.

## Вклад авторов:

Беркаусов Д.А. — сбор и анализ результатов полевых испытаний, подбор эмпирических зависимостей, работа над текстом статьи.

Невзоров А.Л. — поиск и анализ литературы по теме исследования, разработка плана исследования, работа над текстом статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Bartolomej A.A., Omel'chak I.M., Jushkov B.S. *Pile foundation settlement prediction*. Moscow, Stroyizdat, 1994; 380. (rus.).
2. Gavrillov P., Glukhov V. Assessment of the bearing capacity of piles during static load test. *Construction and Architecture*. 2020; 8(4):22-27. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-4-22-27. EDN PVQHOG. (rus.).
3. Goldfeld I.Z. Share of the work of a vertically loaded pile during static tests of soils. *Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation : materials of the reports of the Fourteenth All-Russian scientific and practical conference and exhibition of survey organizations*. 2018; 469-481. EDN YZVZPV. (rus.).
4. Hansen J.B. Discussion of "Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1963; 89(4):241-242. DOI: 10.1061/jsfeaq.0000542
5. Chin F.K. Estimation of the Ultimate Load of Piles Not Carried to Failure. *Proceedings of the Second Southeast Asian Conference on Soil Engineering*. 1970; 81-90.
6. Decourt L. Behavior of foundations under working load conditions. *Proceedings of the 11th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 1999; 4:453-488.
7. Davisson M.T. High capacity piles. *Proceedings of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction. American Society of Civil Engineers*. 1972; 81-112.
8. Fellenius B.H. What capacity value to choose from the results a static loading test. We have determined the capacity, then what? *Deep Foundation Institute, Fulcrum Winter*. 2001; 19-26.
9. Olgun M., Yenginar Y., Hanati A. Interpreting Load-Settlement Curves of Pile Foundations by Graphical Methods. *3rd International Soil-Structure Interaction Symposium*. 2017.
10. Adel R., Shakir R.R. Evaluation of Static Pile Load Test Results of Ultimate Bearing Capacity by Interpreting Methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022; 961(1):012013. DOI: 10.1088/1755-1315/961/1/012013
11. Birid K.C. Evaluation of Ultimate Pile Compression Capacity from Static Pile Load Test Results. *1st GeoMEast International Congress and Exhibition*. 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-61642-1\_1
12. Dalerici G., Bovolenta R. A New Method for the Evaluation of the Ultimate Load of Piles by Tests not Carried to Failure. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2014; 32(6):1415-1426. DOI: 10.1007/s10706-013-9673-z
13. Dey S.K., Ansary M.A. Evaluation of pile capacity estimation methods in Bangladesh: A comparative study using static analysis and load tests. *International Journal of Science and Research Archive*. 2025; 15(3):1306-1313. DOI: 10.30574/ijrsra.2025.15.3.1861
14. Mishra A., Sawant V.A., Deshmukh V.B. Prediction of pile capacity of socketed piles using different approaches. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019; 37(6):5219-5230. DOI: 10.1007/s10706-019-00976-0
15. Fellenius B.H. The analysis of results from routine pile load tests. *Ground Engineering*. 2005; 21-29.
16. Meyer Z., Stachecki K. Static load test curve (Q-s) conversion in to pile of different size. *Annals of Warsaw University of Life Sciences — SGGW. Land Reclamation*. 2018; 50(2):171-182. DOI: 10.2478/ssggw-2018-0014
17. Schmidt O.A. Improvement of the methodology for determining the bearing capacity of piles based on the results of static tests. *Modern equipment, methods of instrumental inspection and strengthening of buildings and structures : collection of scientific articles based on the materials of the International scientific and practical conference*. 2019; 80-87. EDN ZZFBYL. (rus.).
18. Ter-Martirosyan Z.G., Filippov K.A. A solution to the problem of pile settlement caused by vertical static loading with consideration to plastic properties of the foundation soil. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(7): 871-881. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.7.871-881. EDN DFGSWY. (rus.).
19. Ahmed Z., Hore S., Ansary M., Hore R., Ansary M.A. Comparative Evaluation of Pile Load Capacity Using Static and Dynamic Test. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2025; 43(6). DOI: 10.1007/s10706-025-03205-z
20. Cuajao V.C.S. Comparison of static and dynamic load testing : a review. *International Journal of GEOMATE*. 2024; 27(121). DOI: 10.21660/2024.121.g13441

*Received July 1, 2025.*

*Adopted in revised form on October 19, 2025.*

*Approved for publication on December 30, 2025.*

**B I O N O T E S:** **Dmitry A. Berkausov** — postgraduate student; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)**; 17 Embankment of Northern Dvina River, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; berkausov.d@gmail.com;

**Alexander L. Nevzorov** — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)**; 17 Embankment of Northern Dvina River, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; ID RSCI: 393637, Scopus: 7004203097, ResearcherID: J-2809-2012, ORCID: 0000-0002-6547-2741; a.l.nevzorov@yandex.ru.

*Contribution of the authors:*

*Dmitry A. Berkausov — collection and analysis the results of field tests, selection of empirical correlations, working on article text.*

*Alexander L. Nevzorov — search and analysis of literature on the research topic, creating research plan, working on article text.*

*The authors declare that they have no conflict of interest.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.075.23

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.333-349

## Использование регрессионного анализа для совершенствования методики расчета железобетонных конструкций на действие поперечной силы

Сергей Алексеевич Зенин<sup>1</sup>, Александр Михайлович Бударин<sup>2</sup>,  
Евгений Александрович Редикульцев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Институт Гидропроект; г. Москва, Россия;

<sup>3</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ); г. Екатеринбург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Механизм разрушения железобетонных конструкций от действия поперечной силы — объект исследования отечественных и зарубежных ученых на протяжении многих десятилетий. Повышенный интерес к этому механизму разрушения обусловлен его опасностью — разрушение конструкций от действия поперечной силы зачастую имеет хрупкий, внезапный характер. Несущая способность и характер разрушения железобетонной конструкции в рамках данного механизма зависят от множества конструктивных параметров, что значительно усложняет его изучение. В качестве основных конструктивных параметров, оказывающих влияние на несущую способность в рамках указанного механизма разрушения, можно выделить: прочность бетона, геометрические характеристики сечения, величину относительного пролета среза конструкции, содержание продольной арматуры растянутой зоны и интенсивность поперечного армирования конструкции. Также к таким параметрам можно отнести масштабный энергетический эффект, понятие которого раскрыто в работе. Методика расчета железобетонных конструкций по наклонным сечениям на действие поперечной силы, представленная в СП 63.13330.2018, только косвенно учитывает влияние содержания продольной арматуры растянутой зоны и не учитывает масштабный энергетический эффект, что оказывает влияние на ее точность. Актуальной является задача модификации расчетной методики за счет учета данных конструктивных параметров.

**Материалы и методы.** Для получения коэффициентов уточненной методики использовался регрессионный анализ, выполненный методом наименьших квадратов с применением алгоритма Левенберга – Марквардта.

**Результаты.** Представлена уточненная методика расчета железобетонных конструкций по наклонному сечению на действие поперечной силы, учитывающая влияние процента продольного армирования растянутой зоны конструкции, а также масштабного энергетического эффекта. Приведено сопоставление уточненной методики и оригинальной методики из СП 63.13330.2018 с результатами лабораторных испытаний 958 образцов. Образцы разделены на группы в соответствии с величинами конструктивных параметров.

**Выводы.** Уточненная методика расчета железобетонных конструкций по наклонному сечению на действие поперечной силы более точная, чем нормативная методика, представленная в СП 63.13330.2018. Применение уточненного метода расчета позволит корректно оценивать несущую способность наклонных сечений при действии поперечных сил, что в ряде случаев приведет к сокращению расхода поперечной арматуры.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** железобетон, расчет, прочность, наклонные сечения, поперечная сила, регрессионный анализ, метод наименьших квадратов, алгоритм Левенберга – Марквардта

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Зенин С.А., Бударин А.М., Редикульцев Е.А. Использование регрессионного анализа для совершенствования методики расчета железобетонных конструкций на действие поперечной силы // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 3. С. 333–349. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.333-349

Автор, ответственный за переписку: Александр Михайлович Бударин, alex.budarin01@gmail.com.

## Application of regression analysis to improve the shear design method for reinforced concrete structures

Sergei A. Zenin<sup>1</sup>, Alexander M. Budarin<sup>2</sup>, Evgeny A. Redikultsev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev of Research Centre for Construction; Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Institute Hydroproject; Moscow, Russian Federation;

<sup>3</sup> Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU); Yekaterinburg, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction.** The mechanism of failure of reinforced concrete structures from the action of shear force has been the object of research of Russian and foreign scientists for many decades. This failure mechanism garners significant attention due to its danger — the shear failure is often brittle and sudden. The bearing capacity and the type of failure of reinforced concrete structure within this mechanism depends on a variety of design parameters, which greatly complicates its study. Key parameters influencing load-bearing capacity in shear failure include the strength of concrete, geometric characteristics of the cross-section, span-to-depth ratio, percentage of tensile reinforcement and the transverse reinforcement intensity. Also, to such parameters can be attributed the energetic size effect which concept is disclosed in the paper. The shear design method, presented in building code SP 63.13330.2018 only indirectly accounts percentage of tensile reinforcement. It also does not consider the energetic size effect, which impacts its accuracy. It is urgent to modify the design method by taking into account these design parameters.

**Materials and methods.** To obtain the coefficients of the refined design method, the regression analysis performed by the least squares method using the Levenberg – Marquardt algorithm was used.

**Results.** The paper presents a refined method for shear design of reinforced concrete structures which takes into account the influence of the percentage of tensile reinforcement and energetic size effect. A comparison of the refined design method and the original methodology from SP 63.13330.2018 with the results of laboratory tests of 958 specimens is presented. The specimens are divided into groups according to the values of the design parameters.

**Conclusions.** The refined design method for shear design of reinforced concrete structures is more accurate than the normative method presented in SP 63.13330.2018. The application of the refined calculation method will allow to correctly assess the load-bearing capacity of inclined sections under the action of shear forces, which in some cases will lead to a reduction in the consumption of transverse reinforcement.

**KEYWORDS:** reinforced concrete, strength, inclined sections, shear force, regression analysis, least squares, Levenberg – Marquardt algorithm

**FOR CITATION:** Zenin S.A., Budarin A.M., Redikultsev E.A. Application of regression analysis to improve the shear design method for reinforced concrete structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(3):333-349. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.333-349 (rus.).

*Corresponding author:* Alexander M. Budarin, alex.budarin01@gmail.com.

## ВВЕДЕНИЕ

Механизм разрушения железобетонных конструкций от действия поперечной силы — объект исследования отечественных и зарубежных ученых на протяжении многих десятилетий. Повышенный интерес к этому механизму разрушения обусловлен его опасностью — разрушение конструкций от действия поперечной силы зачастую имеет хрупкий, внезапный характер. Несущая способность и характер разрушения железобетонной конструкции в рамках данного механизма зависят от множества конструктивных параметров, что значительно усложняет его изучение. В соответствии с результатами теоретических и лабораторных исследований, выполненных различными авторами, можно выделить ряд основных параметров, оказывающих влияние на несущую способность железобетонных конструкций при действии поперечной силы:

1. Одними из ключевых параметров, влияющих на сопротивление железобетонного элемента действию поперечных сил, являются геометрические характеристики поперечного сечения, а также прочность бетона. В отечественных нормах прочность бетона выражена через сопротивление бетона растяжению как более логичное представление работы сечения при данном воздействии.

2. Также одним из ключевых параметров, обуславливающих механизм разрушения конструкции и ее несущую способность, служит относительный пролет среза  $a/h_0$ , определяемый как расстояние от точки приложения нагрузки до опоры  $a$ , деленное на рабочую высоту  $h_0$ . При уменьшении величины

$a/h_0$  наблюдается увеличение вклада бетона  $Q_b$  в несущую способность конструкции [1, 2]. Наиболее интенсивный рост  $Q_b$  отмечается при  $a/h_0 < 2-2,5$  и уменьшении несущей способности образца. При этом, согласно выводам работы [3], при величинах  $a/h_0 > 3$  изменение  $Q_b$  практически не наблюдается. С ростом величины пролета среза фиксируется увеличение вклада поперечной арматуры в несущую способность конструкции  $Q_{sw}$  [4], обусловленное увеличением длины проекции наклонной трещины и, как следствие, ростом количества арматурных стержней, включенных в работу.

3. Содержание продольной арматуры. С увеличением процента продольного армирования растянутой зоны изгибаемого элемента регистрируется увеличение несущей способности конструкции, обусловленное увеличением вклада сил зацепления в трещине, остаточных нормальных напряжений, нагельного эффекта и увеличением высоты сжатой зоны [5].

4. Масштабный энергетический эффект представляет собой тенденцию к уменьшению относительной несущей способности конструкции (относительно рабочей высоты) с ростом ее рабочей высоты. Наличие этого эффекта связано с разностью скоростей изменения высвобождаемой потенциальной энергии деформации  $U_E$  и поверхностной энергии  $\Gamma$  с ростом длины трещины [6]. Влияние масштабного энергетического эффекта уменьшается со снижением величины относительного пролета среза  $a/h_0$ . Подобное поведение вызвано тем, что при малых пролетах среза несущая способность конструкции в большей степени контролируется

условной сжатой полосой, расположенной между опорой и точкой приложения нагрузки, и в меньшей степени зависит от трещин растяжения.

5. Наличие поперечной арматуры — установка поперечной арматуры значительно повышает несущую способность элемента при действии поперечных сил и предельную деформативность. Увеличение интенсивности поперечного армирования уменьшает влияние масштабного энергетического эффекта на несущую способность конструкции. Эта тенденция объясняется участием поперечной арматуры в уравнении энергетического баланса при росте магистральной трещины, формирующей поверхность разрушения.

За многолетнюю историю исследования механизма разрушения железобетонных конструкций от действия поперечной силы было создано множество расчетных методик, позволяющих оценить несущую способность конструкции. Часть из этих методик в настоящее время представлена в действующих нормативных документах. Методика расчета железобетонных конструкций на действие поперечных сил, приведенная в СП 63.13330.2018<sup>1</sup>, основана на трудах М.С. Боришанского и А.А. Гвоздева [6–9] и получила развитие в работах А.С. Залесова [10, 11], М.С. Торяника [12], О.Ф. Ильина [13] и др. Согласно этой методике, должна быть обеспечена прочность элемента по полосе между наклонными сечениями, по наклонному сечению на действие изгибающего момента и по наклонному сечению на действие поперечных сил. Величина несущей способности, полученная для конструкций с разрушением по наклонному сечению от действия изгибающего момента, а также по наклонной полосе между трещинами имеет хорошее совпадение с опытными данными. Основным интерес для изучения представляет методика разрушения по наклонным сечениям от действия поперечной силы.

Прочность элемента по наклонному сечению на действие поперечной силы вычисляется как сумма вкладов бетона  $Q_b$  и поперечной арматуры  $Q_{sw}$  согласно формулам (1)–(7):

$$Q_{ult} = Q_b + Q_{sw}; \quad (1)$$

$$Q_{b,\min} \leq Q_b = \varphi_{b2} \cdot \varphi_n \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_0 \cdot \frac{h_0}{C} \leq Q_{b,\max}; \quad (2)$$

$$Q_{b,\min} = 0,5 \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_0; \quad (3)$$

$$Q_{b,\max} = 2,5 \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_0; \quad (4)$$

$$Q_{sw} = \varphi_{sw} \cdot q_{sw} \cdot C_{sw}; \quad (5)$$

$$q_{sw} = \frac{R_{sw} \cdot A_{sw}}{s_w} \geq 0,25 \cdot R_{bt} \cdot b; \quad (6)$$

$$\varphi_n = \begin{cases} 1 + \sigma_{cp}/R_b, & \text{если } 0 < \sigma_{cp}/R_b \leq 0,25 \\ 1,25, & \text{если } 0,25 < \sigma_{cp}/R_b \leq 0,75 \\ 5 \cdot (1 - \sigma_{cp}/R_b), & \text{если } 0,75 < \sigma_{cp}/R_b \leq 1 \\ 1 - \sigma_t/2 \cdot R_{bt}, & \text{если } 0 < \sigma_t/R_{bt} \leq R_{bt} \end{cases} \quad (7)$$

где  $\varphi_{b2}$  — эмпирический коэффициент, обеспечивающий приближение расчетных и опытных значений прочности и принимаемый равным 1,5;  $\varphi_n$  — функция, учитывающая влияние продольных сжимающих  $\sigma_{cp}$  и растягивающих  $\sigma_t$  напряжений в элементе;  $R_{bt}$  — прочность бетона на одноосное растяжение;  $C$  — длина проекции наиболее опасного наклонного сечения на продольную ось элемента;  $\varphi_{sw} = 0,75$  — коэффициент, учитывающий дискретность расположения стержней поперечной арматуры;  $C_{sw}$  — длина проекции наклонной трещины для учета вклада поперечной арматуры, принимаемая в диапазоне  $h_0 - 2h_0$ ;  $R_{sw}$  — предел текучести поперечной арматуры;  $A_{sw}$  — площадь поперечной арматуры;  $s_w$  — шаг поперечной арматуры.

В данной методике отсутствует возможность учета влияния продольной растянутой арматуры, выражаемой, как правило, через процент армирования  $\mu$  и масштабного энергетического эффекта. Отсутствие учета влияния этих параметров может оказывать влияние на точность нормативной расчетной методики. Таким образом, актуальной является задача модификации методики расчета железобетонных конструкций по наклонным сечениям при действии поперечной силы.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В общем виде более точная методика расчета железобетонных конструкций по наклонному сечению на действие поперечной силы может быть представлена в виде выражений (8)–(13):

$$Q_{ult} = Q_b + Q_{sw}; \quad (8)$$

$$Q_{b,\min} \leq Q_b = x_1 \cdot \varphi_n \cdot R_{bt} \cdot h_0 \times \\ \times b \cdot \frac{h_0}{C} \cdot f_1(h_0) \cdot f_2(\mu) \leq Q_{b,\max}; \quad (9)$$

$$\varphi_n = \begin{cases} 1 + \sigma_{cp}/R_b, & \text{если } 0 < \sigma_{cp}/R_b \leq 0,25 \\ 1,25, & \text{если } 0,25 < \sigma_{cp}/R_b \leq 0,75 \\ 5 \cdot (1 - \sigma_{cp}/R_b), & \text{если } 0,75 < \sigma_{cp}/R_b \leq 1 \\ 1 - \sigma_t/2 \cdot R_{bt}, & \text{если } 0 < \sigma_t/R_{bt} \leq R_{bt} \end{cases} \quad (10)$$

<sup>1</sup> СП 63.13330.2018. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М. : Минстрой России, 2018.

$$f_1(h_0, C) = \frac{1}{\sqrt{1 + h_0/x_2 \cdot k(h_0/C)}}; \quad (11)$$

$$f_2(\mu) = \mu^{x_3}; \quad (12)$$

$$Q_{sw} = x_4 \cdot \frac{A_{sw} \cdot R_{sw}}{s_w}, \quad (13)$$

где  $x = x_1, x_2, x_3, x_4$  — коэффициенты функций;  $f_1(h_0)$  — функция, отражающая влияние масштабного энергетического эффекта, основанная на законе масштабного эффекта З. Бажанта [6]. Эта функция, в отличие от аналогичных функций, представленных в Eurocode 2<sup>2</sup> и Model Code 2010<sup>3</sup>, не является полностью эмпирической и может быть получена из уравнения баланса энергии при росте трещины в бетоне;  $f_2(\mu)$  — функция, отражающая влияние процента продольного армирования растянутой зоны;  $k$  — функция, учитывающая изменение влияния масштабного энергетического эффекта в зависимости от величины  $h_0/C$ .

Таким образом, задача по построению методики сводится к поиску коэффициентов  $x$ . Величины коэффициентов могут быть найдены с помощью регрессионного анализа на основании результатов лабораторных испытаний методом наименьших квадратов (МНК). Основная идея МНК заключается в поиске величин коэффициентов, дающих наименьшую сумму разностей квадратов между результатами экспериментальных данных  $Q_{exp}$  и результатами, полученными с помощью функции  $Q_{calc}$ :

$$F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m f_i^2(x) = \sum_{i=1}^m (Q_{calc,i}(x) - Q_{exp,i})^2 \rightarrow \min, \quad (14)$$

где  $i$  — порядковый номер результата экспериментальных данных.

Задача может быть решена с помощью алгоритма Левенберга – Марквардта [14, 15], позволяющего осуществить итеративный поиск решения задачи о наименьших квадратах, описанной функцией (14). Регрессионный анализ осуществлялся в несколько этапов. На первом этапе, используя результаты испытаний железобетонных конструкций без поперечной арматуры с  $a/h_0 \geq 2$ , выполнялся подбор коэффициентов  $x_1, x_2, x_3$ . Применение результатов с  $a/h_0 \geq 2$  позволяет исключить влияние функции  $k(h_0/C)$ . В рамках первого этапа использовалось уравнение регрессии, описанное формулами (15)–(17). Уравнение было получено на основании выражений (9)–(12):

$$x_1 \cdot A_1 \cdot (1 + h_0 \cdot x_2^{-1})^{-1} \cdot A_2^{x_3} - Q_{exp} = 0; \quad (15)$$

$$A_1 = \varphi_n \cdot R_{bt} \cdot b \cdot \frac{h_0}{C}; \quad (16)$$

$$A_2 = \mu. \quad (17)$$

Далее, применяя подобранные коэффициенты  $x_1, x_2, x_3$  на основании результатов испытаний плит без поперечной арматуры с  $a/h_0 < 2$ , проводилось конструирование функции  $k(h_0/C)$ . На последнем этапе на основании результатов испытаний конструкций с поперечной арматурой, а также подобранных ранее коэффициентов  $x_1, x_2, x_3$  и функции  $k(h_0/C)$  выполнялся подбор коэффициента  $x_4$ . Для этого этапа использовалось следующее уравнение регрессии, полученное на основании выражений (8) и (13) и описываемое формулами (18), (19):

$$x_1 \cdot A_1 \cdot (1 + h_0 \cdot x_2^{-1})^{-1} \cdot A_2^{x_3} + x_4 \cdot A_3 - Q_{exp} = 0; \quad (18)$$

$$A_3 = \frac{A_{sw} \cdot R_{sw}}{s_w}. \quad (19)$$

В качестве исходных данных для анализа применялись результаты испытаний 1407 железобетонных конструкций, представленные в работах [1–3, 16–95]. Из выборки исключены 224 элемента, разрушение которых произошло по нормальному сечению в результате действия изгибающего момента ( $M \geq M_{ult}$ ). Из оставшихся 1183 элементов исключены элементы, разрушение которых осуществилось по наклонному сечению от действия изгибающего момента (212 образцов), а также элементы, разрушение которых возникло по наклонной полосе между трещинами (13 образцов). На рис. 1 представлены параметры оставшихся 958 образцов, использованных для выполнения регрессионного анализа. Распределение количества образцов по каждому параметру на рис. 1 было разбито для наглядности на четыре части. При этом для относительного пролета среза в максимальном диапазоне 80 % числа опытных образцов имели пролет среза в границах 3,5–4,0  $a/h_0$ .

$$\mu_{sw} = \frac{A_{sw}}{s_w \cdot b} \cdot 100 \%, \quad (20)$$

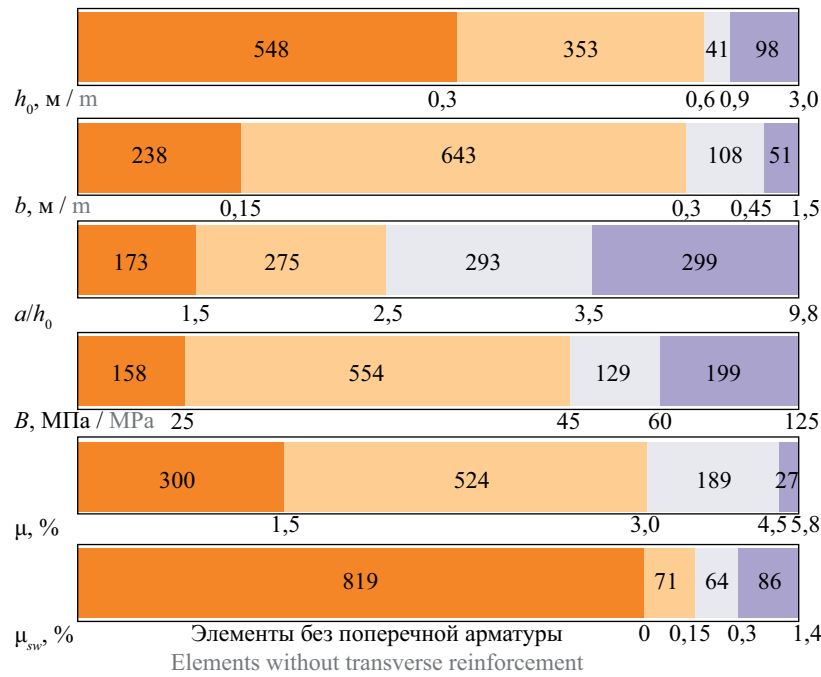
где  $A_{sw}$  — площадь поперечной арматуры в сечении;  $s_w$  — шаг поперечной арматуры.

Для оценки точности расчетной методики используется ряд статистических показателей:

- коэффициент детерминации  $R^2$  — показатель соответствия математической модели данным лабораторных испытаний. Величина  $R^2$  принимает значе-

<sup>2</sup> EN 1992-1-1:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2004.

<sup>3</sup> Model Code 2010 (Final Draft). Fédération internationale du béton fib, Lausanne, Switzerland, 2011.



**Рис. 1.** Параметры конструкций из выборки:  $h_0$  — рабочая высота элемента;  $b$  — ширина элемента;  $a/h_0$  — относительный пролет среза;  $B$  — класс бетона, МПа;  $\mu$  — процент продольного армирования растянутой зоны;  $\mu_{sw}$  — процент поперечного армирования (см. формулу (20))

**Fig. 1.** Parameters of the structures in the dataset:  $h_0$  — effective depth of the element;  $b$  — width of the element;  $a/h_0$  — relative span-to-depth ratio;  $B$  — concrete class, MPa;  $\mu$  — tension zone longitudinal reinforcement ratio;  $\mu_{sw}$  — shear reinforcement ratio (see equation (20))

ния от 0 до 1: чем ближе значение  $R^2$  к 1, тем выше степень соответствия:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{exp,i} - Q_{calc,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{exp,i} - \bar{Q}_{exp})^2}, \quad (21)$$

где  $\bar{Q}_{exp}$  — средняя величина среди опытных результатов;

- коэффициент вариации (Coefficient of Variation — CV является показателем стабильности вычислений и характеризует относительную меру отклонения измеренных значений от среднего арифметического. Чем ближе величина CV к нулю, тем стабильнее результаты;

- максимальная, минимальные величины  $Q_{exp}/Q_{calc}$  характеризуют наибольшее отклонение в сторону завышения и занижения результатов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате выполнения регрессионного анализа с учетом округления коэффициентов  $\chi$  полученное выражение (22)–(29):

$$Q_{ult} = Q_b + Q_{sw}; \quad (22)$$

$$Q_{b,min} \leq Q_b = 1,5 \cdot \varphi_n \cdot R_{bt} \cdot h_0 \cdot b \times \frac{h_0}{C} \cdot f_1(h_0) \cdot f_2(\mu) \leq Q_{b,max}; \quad (23)$$

$$Q_{b,min} = 0,5 \cdot R_{bt} \cdot h_0 \cdot b \cdot f_1(h_0) \cdot f_2(\mu); \quad (24)$$

$$Q_{b,max} = 2,5 \cdot R_{bt} \cdot h_0 \cdot b \cdot f_1(h_0) \cdot f_2(\mu); \quad (25)$$

$$f_1(h_0, C) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{h_0}{0,35[M]} \cdot k(h_0/C)}}; \quad (26)$$

$$f_2(\mu) = \mu^{1/4}, \mu \leq 3\%; \quad (27)$$

$$k(h_0/C) = \begin{cases} 5, & \text{если } h_0/C \geq 1 \\ 8 \cdot h_0/C^{-3}, & \text{если } 1/2 \leq h_0/C < 1; \\ 1, & \text{если } h_0/C < 1/2 \end{cases} \quad (28)$$

$$Q_{sw} = 0,75 \cdot \frac{A_{sw} \cdot R_{sw}}{s_w}. \quad (29)$$

На рис. 2 изображено графическое представление функций (26) и (27), учитывающих влияние процента продольного армирования растянутой зоны и масштабного энергетического эффекта.

Вопрос уточнения граничных значений вклада бетона  $Q_b$  в целом требует отдельного рассмотрения. В настоящем исследовании в граничные значения вклада бетона  $Q_b$  (23), представленные в формулах (24) и (25), были введены функции  $f_1(h_0, C)$  и  $f_2(h_0)$ . Добавление функций в граничные условия

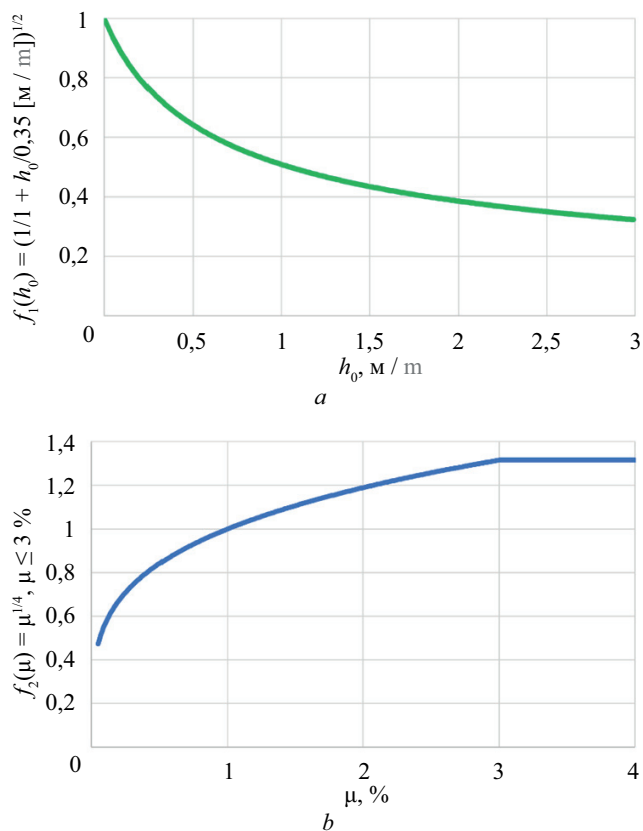


Рис. 2. Графическое представление функции: а —  $f_1(h_0, C)$  (26), учитывающей влияние масштабного энергетического эффекта; б —  $f_2(h_0)$  (27), учитывающей влияние процента продольного армирования растянутой зоны

Fig. 2. Graphical representation of function: а —  $f_1(h_0, C)$  (26) which takes into account the influence of energetic size effect; б —  $f_2(h_0)$  (27) which takes into account the influence of the tensile reinforcement percentage

позволяет отразить замедление роста величины  $Q_b$  с ростом  $h_0$  [96], а также влияние процента продольного армирования на эффективность механизмов сопротивления действию поперечной силы.

На рис. 3 представлено сравнение величин предельной поперечной силы, полученной в рамках ла-

бораторных испытаний  $Q_{exp}$  и с помощью расчетных методик  $Q_{calc}$  для железобетонных элементов без поперечной арматуры с величиной относительного пролета среза  $a/h_0 < 2$ . В табл. 1 приведены некоторые статистические показатели сравнения значений  $Q_{calc}$  и  $Q_{exp}$  для железобетонных элементов без поперечной

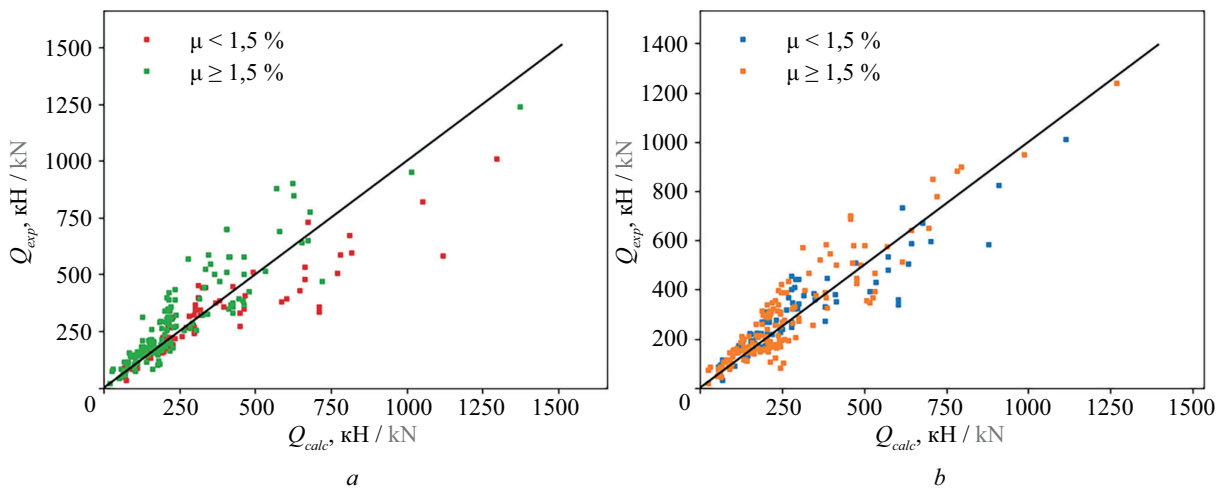


Рис. 3. Зависимость  $Q_{exp}$  от  $Q_{calc}$  для элементов без поперечной арматуры с величиной пролета среза  $a/h_0 < 2$  для СП 63.13330.2018 (а) и представленной методики (б)

Fig. 3. Dependence of  $Q_{exp}$  on  $Q_{calc}$  for elements without shear reinforcement with span-to-depth ratio  $a/h_0 < 2$  for SP 63.13330.2018 (а) and proposed method (б)

**Табл. 1.** Показатели оценки результатов сравнения  $Q_{exp}$  и  $Q_{calc}$  для элементов без поперечной арматуры с  $a/h_0 < 2$   
**Table 1.** Evaluation indicators of  $Q_{exp}$  and  $Q_{calc}$  comparison results for elements without shear reinforcement with  $a/h_0 < 2$

Показатель Indicator	СП 63.13330.2018 SP 63.13330.2018		Предложенная методика Proposed method	
	$\mu < 1,5 \%$	$\mu \geq 1,5 \%$	$\mu < 1,5 \%$	$\mu \geq 1,5 \%$
$R^2$	0,49	0,78	0,77	0,83
CV	0,25	0,31	0,25	0,31
Минимум $Q_{exp}/Q_{calc}$ Minimum $Q_{exp}/Q_{calc}$	0,44	0,51	0,49	0,34
Максимум $Q_{exp}/Q_{calc}$ Maximum $Q_{exp}/Q_{calc}$	1,48	2,97	1,66	3,06
Среднее значение $Q_{exp}/Q_{calc}$ Mean value $Q_{exp}/Q_{calc}$	0,97	1,24	1,10	1,21

арматуры с величиной относительного пролета среза  $a/h_0 < 2$ .

На основании показателей, представленных в табл. 1, можно заключить, что уточненная методика имеет более высокую степень соответствия опытным данным для железобетонных конструкций без поперечной арматуры с  $a/h_0 < 2$ .

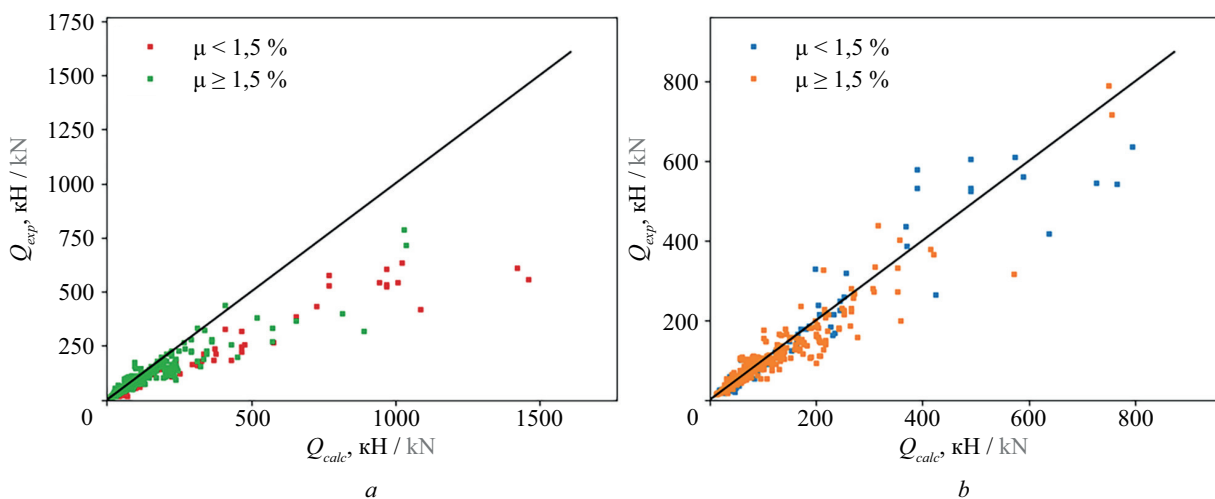
Сравнение величин предельной поперечной силы, полученной в рамках лабораторных испытаний  $Q_{exp}$  и с помощью расчетных методик  $Q_{calc}$  для железобетонных элементов без поперечной арматуры с величиной относительного пролета среза  $a/h_0 \geq 2$ , показано на рис. 4. В табл. 2 представлены общие статистические показатели сравнения значений  $Q_{calc}$  и  $Q_{exp}$  для железобетонных элементов без поперечной арматуры с величиной относительного пролета среза  $a/h_0 \geq 2$ .

Также на основании результатов сравнения установлено, что значения, полученные по методике СП 63.13330.2018 для элементов без поперечной арматуры с  $a/h_0 \geq 2$ , имеют тенденцию к завышению несущей способности конструкций с ростом рабо-

чей высоты. Уточненная методика имеет более высокое соответствие опытным данным за счет учета масштабного энергетического эффекта и процента продольного армирования, что подтверждается величинами  $R^2$ , CV (см. табл. 2).

На рис. 5 представлено сравнение величин предельной поперечной силы, полученной в рамках лабораторных испытаний  $Q_{exp}$  и с помощью расчетных методик  $Q_{calc}$  для железобетонных элементов с поперечной арматурой с величиной относительного пролета среза  $a/h_0 < 2$ . В табл. 3 приведены отдельные статистические показатели сравнения значений  $Q_{calc}$  и  $Q_{exp}$  для железобетонных элементов с поперечной арматурой с величиной относительного пролета среза  $a/h_0 < 2$ . Разделение результатов в зависимости от процента продольного армирования не выполнялось из-за малого количества образцов с  $\mu < 1,5 \%$ .

Вследствие показателей, представленных в табл. 3, можно заключить, что обе расчетные методики имеют примерно одинаковую степень соответствия опытным данным для элементов с поперечной арматурой и  $a/h_0 < 2$ .

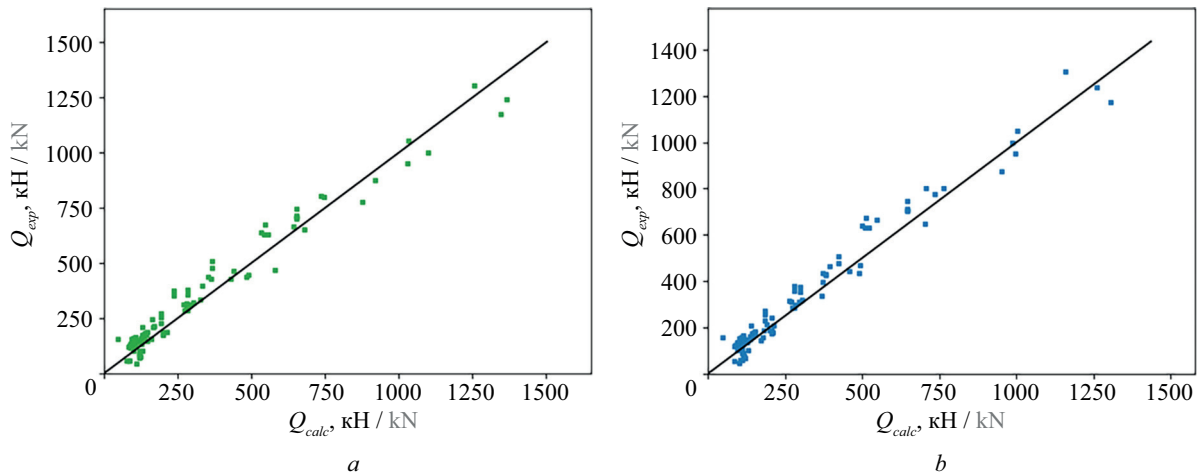


**Рис. 4.** Зависимость  $Q_{exp}$  от  $Q_{calc}$  для элементов без поперечной арматуры с величиной пролета среза  $a/h_0 \geq 2$  для СП 63.13330.2018 (a) и представленной методики (b)

**Fig. 4.** Dependence of  $Q_{exp}$  on  $Q_{calc}$  for elements without shear reinforcement with span-to-depth ratio  $a/h_0 \geq 2$  for SP 63.13330.2018 (a) and proposed method (b)

**Табл. 2.** Показатели оценки результатов сравнения  $Q_{exp}$  и  $Q_{calc}$  для элементов без поперечной арматуры с  $a/h_0 \geq 2$   
**Table 2.** Evaluation indicators of  $Q_{exp}$  and  $Q_{calc}$  comparison results for elements without shear reinforcement with  $a/h_0 \geq 2$

Показатель Indicator	СП 63.13330.2018 SP 63.13330.2018		Предложенная методика Proposed method	
	$\mu < 1,5 \%$	$\mu \geq 1,5 \%$	$\mu < 1,5 \%$	$\mu \geq 1,5 \%$
$R^2$	-0,43	0,43	0,88	0,86
CV	0,30	0,26	0,26	0,22
Минимум $Q_{exp}/Q_{calc}$ Minimum $Q_{exp}/Q_{calc}$	0,28	0,36	0,43	0,47
Максимум $Q_{exp}/Q_{calc}$ Maximum $Q_{exp}/Q_{calc}$	1,56	2,00	1,71	1,89
Среднее значение $Q_{exp}/Q_{calc}$ Mean value $Q_{exp}/Q_{calc}$	0,68	0,96	0,96	1,04



**Рис. 5.** Зависимость  $Q_{exp}$  от  $Q_{calc}$  для элементов с поперечной арматурой с величиной пролета среза  $a/h_0 < 2$  для СП 63.13330.2018 (а) и представленной методики (б)

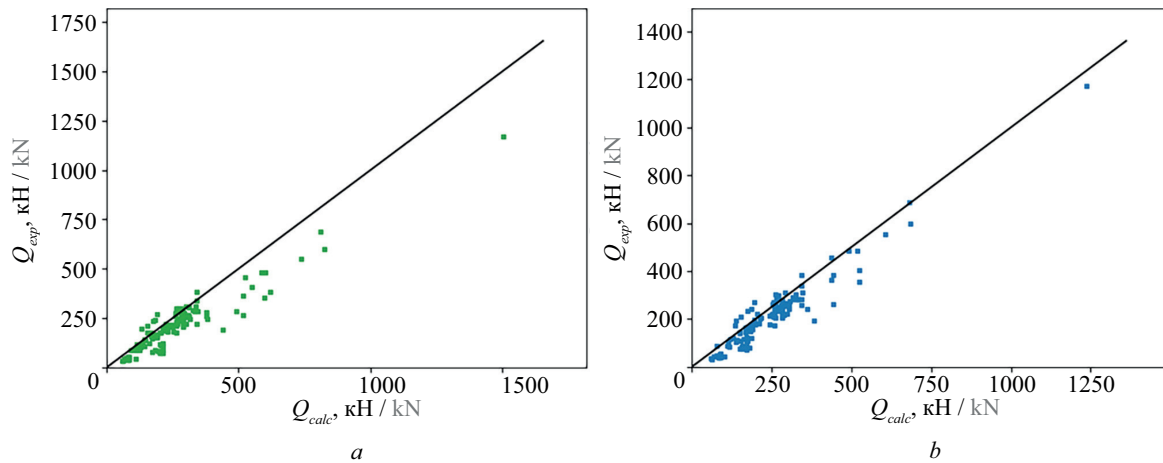
**Fig. 5.** Dependence of  $Q_{exp}$  on  $Q_{calc}$  for elements with shear reinforcement with span-to-depth ratio  $a/h_0 < 2$  for SP 63.13330.2018 (a) and proposed method (b)

**Табл. 3.** Показатели оценки результатов сравнения  $Q_{exp}$  и  $Q_{calc}$  для элементов с поперечной арматурой с  $a/h_0 < 2$   
**Table 3.** Evaluation indicators of  $Q_{exp}$  and  $Q_{calc}$  comparison results for elements with shear reinforcement with  $a/h_0 < 2$

Показатель Indicator	СП 63.13330.2018 SP 63.13330.2018	Предложенная методика Proposed method
$R^2$	0,96	0,96
CV	0,27	0,26
Минимум $Q_{exp}/Q_{calc}$ Minimum $Q_{exp}/Q_{calc}$	0,41	0,45
Максимум $Q_{exp}/Q_{calc}$ Maximum $Q_{exp}/Q_{calc}$	3,42	3,36
Среднее значение $Q_{exp}/Q_{calc}$ Mean value $Q_{exp}/Q_{calc}$	1,23	1,18

Сравнение величин предельной поперечной силы, полученной в рамках лабораторных испытаний  $Q_{exp}$  и с помощью расчетных методик  $Q_{calc}$  для железобетонных элементов с поперечной арматурой с величиной относительного пролета среза  $a/h_0 \geq 2$ , приведено на рис. 6. В табл. 4 представлены

статистические показатели сравнения значений  $Q_{calc}$  и  $Q_{exp}$  для железобетонных элементов с поперечной арматурой с величиной относительного пролета среза  $a/h_0 \geq 2$ . Разделение результатов в зависимости от процента продольного армирования не выполнялось из-за малого количества образцов с  $\mu < 1,5 \%$ .



**Рис. 6.** Зависимость  $Q_{exp}$  от  $Q_{calc}$  для элементов с поперечной арматурой с величиной пролета среза  $a/h_0 \geq 2$  для СП 63.13330.2018 (а) и представленной методики (б)

**Fig. 6.** Dependence of  $Q_{exp}$  on  $Q_{calc}$  for elements with shear reinforcement with span-to-depth ratio  $a/h_0 \geq 2$  for SP 63.13330.2018 (a) and proposed method (b)

**Табл. 4.** Показатели оценки результатов сравнения  $Q_{exp}$  и  $Q_{calc}$  для элементов с поперечной арматурой с  $a/h_0 \geq 2$

**Table 4.** Evaluation indicators of  $Q_{exp}$  and  $Q_{calc}$  comparison results for elements with shear reinforcement with  $a/h_0 \geq 2$

Показатель Indicator	СП 63.13330.2018 SP 63.13330.2018	Предложенная методика Proposed method
$R^2$	0,65	0,86
CV	0,28	0,25
Минимум $Q_{exp}/Q_{calc}$ Minimum $Q_{exp}/Q_{calc}$	0,33	0,41
Максимум $Q_{exp}/Q_{calc}$ Maximum $Q_{exp}/Q_{calc}$	1,47	1,42
Среднее значение $Q_{exp}/Q_{calc}$ Mean value $Q_{exp}/Q_{calc}$	0,89	0,93

Так же, как и для элементов без поперечной арматуры при относительном пролете среза  $a/h_0 \geq 2$ , на основе сравнительного анализа было установлено, что методика расчета по СП 63.13330.2018<sup>1</sup> для элементов с поперечной арматурой и  $a/h_0 \geq 2$  имеет тенденцию к завышению несущей способности с ростом рабочей высоты элемента. При этом данная тенденция является менее выраженной, чем для элементов без поперечной арматуры, что объясняется участием поперечной арматуры в уравнении энергетического баланса при росте трещины [97]. Таким образом, результаты, полученные с помощью уточненной методики, имеют более высокую степень соответствия опытным данным за счет учета масштабного энергетического эффекта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представлена уточненная методика расчета железобетонных конструкций по наклонному сечению на действие поперечной силы. В качестве основы уточненная методика использует метод расчета, изложенный в СП 63.13330.2018<sup>1</sup>. Уточненная ме-

тодика учитывает действие масштабного энергетического эффекта и влияние процента продольного армирования растянутой зоны на несущую способность конструкции.

Величины коэффициентов методики были получены с помощью регрессионного анализа методом наименьших квадратов с применением алгоритма Левенберга – Марквардта. Уточненная методика имеет более высокую степень соответствия результатам опытных данных по сравнению с методикой, представленной в СП 63.13330.2018<sup>1</sup>, что подтверждается сравнением полученных значений коэффициентов детерминации и коэффициентов вариации.

Использование уточненного метода расчета позволит более точно оценивать несущую способность наклонных сечений при действии поперечных сил, что в ряде случаев приведет к сокращению расхода поперечной арматуры. Область применения методики охватывает изгибаемые железобетонные элементы прямоугольного сечения из тяжелого бетона при статическом нагружении. Вместе с тем ее использование требует дополнительной валидации для конструкций из легкого бетона, предваритель-

но напряженных элементов, а также для элементов, работающих при совместном действии поперечных сил и крутящего момента.

Актуальной является задача дальнейшего развития методики расчета железобетонных конструк-

ций на действие поперечной силы. Данная задача подразумевает более точное отражение влияния различных конструктивных параметров и действующих в конструкции усилий (продольной силы, изгибающего момента) на ее несущую способность.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Leonhardt F., Walther R.* The Stuttgart Shear Tests // CACA Translation. 1961. Vol. 111. Issue 28. 134 p.
2. *Jin-Keun K., Yon-Dong P.* Shear strength of reinforced high strength concrete beam without web reinforcement // Magazine of Concrete Research. 1994. Vol. 46. Issue 166. Pp. 7–16. DOI: 10.1680/mac.1994.46.166.7
3. *Kani G.N.J.* How safe are our large reinforced concrete beams? // ACI Journal Proceedings. 1967. Vol. 64. Issue 3. DOI: 10.14359/7549
4. *Залесов А.С., Климов Ю.А.* Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил. К. : Будивельник, 1989. 104 с.
5. *Cavagnis F., Fernández Ruiz M., Muttoni A.* Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: An analysis of the critical shear crack development on the basis of test results // Engineering Structures. 2015. Vol. 103. Pp. 157–173. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.09.015
6. *Bazant Z., Planas J.* Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials. Boca Raton : C.R.C., 2019. DOI: 10.1201/9780203756799
7. *Боршанский М.С.* Расчет отогнутых стержней и хомутов в изгибаемых железобетонных элементах по стадии разрушения. М. : Государственное издательство строительной литературы, 1946. 78 с.
8. *Боршанский М.С.* Расчет железобетонных элементов при действии поперечных сил // Издательство литературы по строительству. 1964. С. 122–143.
9. *Гвоздев А.А.* Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. М. : Государственное издательство строительной литературы, 1949. 280 с.
10. *Залесов А.С.* Новый метод расчета прочности железобетонных элементов по наклонным сечениям // Расчет и конструирование железобетонных конструкций : труды института. 1977. № 39. С. 16–28.
11. *Залесов А.С., Ильин О.Ф.* Опыт построения новой теории прочности балок в зоне действия поперечных сил // Новое о прочности железобетона. М. : Стройиздат, 1977. С. 115–140.
12. *Торяник М.С., Митрофанов В.П.* Прочность и деформации железобетонных балок, разрушающихся по наклонной трещине // Бетон и железобетон. 1970. № 2. С. 39–41.
13. *Ильин О.Ф.* Исследование железобетонных балок из высокопрочного бетона при действии поперечных сил : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1973. 22 с.
14. *Levenberg K.* A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares // Quarterly of Applied Mathematics. 1944. Vol. 2. Issue 2. Pp. 164–168. DOI: 10.1090/qam/10666
15. *Marquardt D.W.* An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. 1963. Vol. 11. Issue 2. Pp. 431–441. DOI: 10.1137/0111030
16. *Польской П.П.* Прочность и трещиностойкость наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов при различных видах бетона и формах сечения : дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 1998. 262 с.
17. *Игнатовичюс С.* Исследование прочности железобетонных прямоугольных и тавровых балок по наклонному сечению : дис. ... канд. техн. наук. Вильнюс, 1973.
18. *Шейна С.Г.* Прочность и трещиностойкость наклонных сечений железобетонных элементов при совместном действии продольных сжимающих и поперечных сил : дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 1984.
19. *Силантьев А.С.* Соппротивление изгибаемых железобетонных элементов по наклонным сечениям с учетом влияния продольного армирования : дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 257 с. EDN SUPMOP.
20. *Cavagnis F., Fernández Ruiz M., Muttoni A.* An analysis of the shear-transfer actions in reinforced concrete members without transverse reinforcement based on refined experimental measurements // Structural Concrete. 2017. Vol. 19. Issue 1. Pp. 49–64. DOI: 10.1002/suco.201700145
21. *Ismail K.S.* Shear Behaviour of Reinforced Concrete Deep Beams : Ph.D. Thesis. Sheffield, 2016.
22. *Diaz de Cossio R., Siess C.P.* Behavior and strength in shear of beams and frames without web reinforcement // ACI Journal Proceedings. 1960. Vol. 56. Issue 2. Pp. 695–735. DOI: 10.14359/8118
23. *Joergensen H.B., Hoang L.C., Fabrin L.S., Maagaard J.* Influence of High Axial Tension on the Shear Strength of non-shear RC Beams // IABSE Reports. 2013. Vol. 99. Pp. 86–87. DOI: 10.2749/222137813-806474309
24. *Kuhlmann U., Zilch K., Ehmann J., Jähring A., Spitra F.* Querkraftabtragung in Verbundträgern mit

schlaff bewehrter und aus Zugbeanspruchung gerissener Stahlbetonplatte ohne Schubbewehrung. Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf. Institut für Konstruktion und Entwurf Stahl-, Holz-, und Verbundbau, 2002. 109 p.

25. *Madsen M.B., Hansen S., Hoang L.C., Maa-gard J.* N-V Interaction in Reinforced Concrete Elements without Stirrups // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 14. Pp. 2511–2518. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.07.316

26. *Mattock A.H.* Diagonal tension cracking in concrete beams with axial forces // *Journal of the Structural Division*. 1969. Vol. 95. Issue 9. Pp. 1887–1900. DOI: 10.1061/jsdeag.0002353

27. *Acevedo A.B., Bentz E.C., Collins M.P.* Influence of Clamping Stresses on the Shear Strength of Concrete Slabs under Uniform Loads. Research Report No. ROSE-2008/0.5. 2008. 227 p.

28. *Aoyagi Y., Endo T.* Ultimate Shear Capacity of Continuous RC Beams Subjected to Distributed Loading // *Fourth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*. 1993. Pp. 727–732.

29. *Dassow N.A.* Effect of Uniform Load on the Shear Strength of Slender Beams without Shear Reinforcement : master's thesis. Austin : University of Texas at Austin, 2014.

30. *Feldman A., Siess C.P.* Effect of Moment-Shear Ratio on Diagonal Tension Cracking and Strength in Shear of Reinforced Concrete Beams. University of Illinois Engineering Experiment Station. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1955.

31. *Klein J.R.* Behavior of Slender Beams without Stirrups: Effects of Load Distribution and Member Depth : master's thesis. Austin : University of Texas at Austin, 2015.

32. *Krefeld W.J., Thurston C.W.* Studies of the Shear and Diagonal Tension Strength of Simply Supported Reinforced Concrete Beams // *ACI Journal Proceedings*. 1966. Vol. 63. Issue 4. Pp. 451–476. DOI: 10.14359/7633

33. *Leonhardt F., Walther R.* Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung. DAfStb Heft 151 Hrsg. Berlin : Ernst & Sohn, 1962.

34. *Rüsch H., Haugli F.R., Mayer H.* Schubversuche an Stahlbeton Rechteckbalken mit Gleichmassig Verteilter Belastung, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 145. West Berlin : W. Ernst und Sohn, 1962.

35. *Shioya T., Iguro M., Nojiri Y., Akiyama H., Okada T.* Shear strength of large reinforced concrete beams. Special Publication, 1990. Vol. 118. Pp. 259–280.

36. *Smith R.B.L.* Shear reinforcement of reinforced concrete beams subject to distributed loading // *Magazine of Concrete Research*. 1970. Vol. 22. Issue 70. Pp. 17–24. DOI: 10.1680/mac.1970.22.70.17

37. *Uzel A., Podgorniak B., Bentz E.C., Collins M.P.* Design of Large Footings for One-Way Shear // *ACI*

*Structural Journal*. 2011. Vol. 108. Issue 2. Pp. 131–138. DOI: 10.14359/51664247

38. *Campana S., Fernández Ruiz M., Anastasi A., Muttoni A.* Analysis of shear-transfer actions on one-way RC members based on measured cracking pattern and failure kinematics // *Magazine of Concrete Research*. 2013. Vol. 65. Issue 6. Pp. 386–404. DOI: 10.1680/mac.12.00142

39. *Huber P., Huber T., Kollegger J.* Investigation of the shear behavior of RC beams on the basis of measured crack kinematics // *Engineering Structures*. 2016. Vol. 113. Pp. 41–58. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.01.025

40. *Yoon Y.-S., Cook W.D., Mitchell D.* Minimum Shear Reinforcement in Normal, Medium, and High-Strength Concrete Beams // *ACI Structural Journal*. 1996. Vol. 93. Issue 5. Pp. 576–584. DOI: 10.14359/9716

41. *Ghannoum W.M.* Size effect on shear strength of reinforced concrete beams : master's thesis. Montreal : McGill University, 1998.

42. *Clark A.P.* Diagonal tension in reinforced concrete beams // *ACI Journal Proceedings*. 1951. Vol. 48. Issue 10. DOI: 10.14359/11876

43. *Laupa A., Siess C.P., Newmark N.M.* The shear strength of simple-span reinforced concrete beams without web reinforcement. Report DA-49-129-eng-248. University of Illinois Engineering Experiment Station. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1953.

44. *Moody K., Viest I., Elstner R., Hognestad E.* Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Part 1-Tests of Simple Beams // *ACI Journal Proceedings*. 1954. Vol. 51. Issue 12. DOI: 10.14359/11680

45. *Moody K., Viest I., Elstner R., Hognestad E.* Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Part 2-Tests of Restrained Beams Without Web Reinforcement // *ACI Journal Proceedings*. 1955. Vol. 51. Issue 1. Pp. 417–434. DOI: 10.14359/11686

46. *Ferguson P.M.* Some implications of recent diagonal tension tests // *ACI Journal Proceedings*. 1956. Vol. 53. Issue 8. Pp. 157–172. DOI: 10.14359/11507

47. *Morrow J., Viest I.M.* Shear Strength of Reinforced Concrete Frame Members Without Web Reinforcement // *ACI Journal Proceedings*. 1957. Vol. 53. Issue 3. Pp. 833–869. DOI: 10.14359/11558

48. *Chang T.S., Kesler C.E.* Static and fatigue strength in shear of beams with tensile reinforcement // *ACI Journal Proceedings*. 1958. Vol. 54. Issue 6. Pp. 1033–1058. DOI: 10.14359/11493

49. *Rodriguez J.J., Bianchini A.C., Viest I.M., Kesler C.E.* Shear Strength of Two-Span Continuous Reinforced Concrete Beams // *ACI Journal Proceedings*. 1959. Vol. 55. Issue 4. DOI: 10.14359/11409

50. *Sozen M.A., Zwoyer E., Siess C.P.* Investigation of prestressed concrete for highway bridges: Part I strength in shear of beams without web reinforcement.

University of Illinois. Engineering Experiment Station. Bulletin no. 452. 1959.

51. *Mathey R.G., Watstein D.* Shear strength of beams without web reinforcement containing deformed bars of different yield strengths // *ACI Journal Proceedings*. 1963. Vol. 60. Issue 2. Pp. 183–208. DOI: 10.14359/7851

52. *Rajagopalan K.S., Ferguson P.M.* Exploratory shear tests emphasizing percentage of longitudinal steel // *ACI Journal Proceedings*. 1968. Vol. 65. Issue 8. Pp. 634–638. DOI: 10.14359/7501

53. *Bhal N.S.* Über den Einfluss der Balkenhöhe auf die Schubtragfähigkeit von einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung : PhD Thesis. Stuttgart, 1967.

54. *Taylor H.P.* Shear stresses in reinforced concrete beams without shear reinforcement. Technical Report TRA 407. Cement and Concrete Association, 1968.

55. *Aster H., Koch R.* Schubtragfähigkeit dicker Stahlbetonplatten // *Beton-U Stalnbetonbau*. 1974. Vol. 69. Issue 11.

56. *Thorenfeldt E., Drangsholt G.* Shear capacity of reinforced high-strength concrete beams // *ACI Special Publication*. 1990. Vol. 121. Pp. 129–154.

57. *Jin-Keun K., Yon-Dong P.* Shear strength of reinforced high strength concrete beam without web reinforcement // *Magazine of Concrete Research*. 1994. Vol. 46. Issue 166. Pp. 7–16. DOI: 10.1680/mac.1994.46.166.7

58. *Kong P.Y., Rangan B.V.* Shear strength of high-performance concrete beams // *ACI Structural Journal*. 1998. Vol. 95. Issue 6. Pp. 677–688. DOI: 10.14359/581

59. *Kawano H., Watanabe H.* Shear strength of reinforced concrete columns effect of specimen size and load reversal // *Proceedings of the Second Italy-Japan Workshop on Seismic Design and Retrofit of Bridges*. 1997. Pp. 141–154.

60. *Collins M.P., Kuchma D.* How safe are our large, lightly reinforced concrete beams, slabs, and footings? // *ACI Structural Journal*. 1999. Vol. 96. Issue 4. Pp. 473–481. DOI: 10.14359/684

61. *Adebar P.* One-way shear strength of large footings // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2000. Vol. 27. Issue 3. Pp. 553–562. DOI: 10.1139/100-008

62. *Angelakos D., Bentz E.C., Collins M.P.* Effect of concrete strength and minimum stirrups on shear strength of large members // *ACI Structural Journal*. 2001. Vol. 98. Issue 3. Pp. 290–300. DOI: 10.14359/10220

63. *Cao S.* Size effect and the influence of longitudinal reinforcement on the shear : master's thesis. Toronto : University of Toronto, 2001.

64. *Lubell A.S.* Shear in wide reinforced concrete members : Ph.D. Thesis. Toronto, 2006.

65. *Seliem H., Hosny A., Dwairi H., Rizkalla S.* Shear behavior of concrete beams reinforced with

MMFX steel without web reinforcement. NC State University Final Report, Project No. IS-06-08. 2006.

66. *Sherwood E.G., Lubell A.S., Bentz E.C., Collins M.P.* One-way shear strength of thick slabs and wide beams // *ACI Structural Journal*. 2006. Vol. 103. Issue 6. Pp. 794–802. DOI: 10.14359/18229

67. *Smith K., Vantsiotis A.* Shear strength of deep beams // *ACI Journal Proceedings*. 1982. Vol. 79. Issue 3. Pp. 201–213. DOI: 10.14359/10899

68. *Roller J.J., Russel H.G.* Shear strength of high-strength concrete beams with web reinforcement // *ACI Structural Journal*. 1990. Vol. 87. Issue 2. Pp. 191–198. DOI: 10.14359/2682

69. *Xie Y., Ahmad S.H., Yu T., Hino S., Chung W.* Shear ductility of reinforced concrete beams of normal and high-strength concrete // *ACI Structural Journal*. 1994. Vol. 91. Issue 2. Pp. 140–149. DOI: 10.14359/4592

70. *Shin S.W., Lee K.S., Moon J.I., Ghosh S.* Shear strength of reinforced high-strength concrete beams with shear span-to-depth ratios between 1.5 and 2.5 // *ACI Structural Journal*. 1999. Vol. 96. Issue 4. DOI: 10.14359/691

71. *Yoshida Y.* Shear reinforcement for large lightly reinforced concrete members : master's thesis. Toronto, University of Toronto, 2000.

72. *Rahal K.N., Al-Shaleh K.S.* Minimum transverse reinforcement in 65 MPa concrete beams // *ACI Structural Journal*. 2004. Vol. 101. Issue 6. Pp. 872–878. DOI: 10.14359/13463

73. *Cladera A., Mari A.R.* Experimental study on high-strength concrete beams failing in shear // *Engineering Structures*. 2005. Vol. 27. Issue 10. Pp. 1519–1527. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.04.010

74. *Watstein D., Mathey R.G.* Strains in beams having diagonal cracks // *ACI Journal Proceedings*. 1958. Vol. 55. Issue 12. Pp. 717–728. DOI: 10.14359/11384

75. *De Paiva H.R., Siess C.P.* Strength and behavior of deep beams in shear // *Journal of the Structural Division*. 1965. Vol. 91. Issue 5. Pp. 19–41. DOI: 10.1061/JSDEAG.0001329

76. *Ramakrishnan V., Ananthanarayana Y.* Ultimate strength of deep beams in shear // *ACI Journal Proceedings*. 1968. Vol. 65. Issue 2. DOI: 10.14359/7458

77. *Manuel R.* Failure of deep beams // *ACI Special Publication*. 1974. Vol. 42. P. 15.

78. *Mphonde A.G., Frantz G.C.* Shear tests of high- and low-strength concrete // *ACI Special Publication*. 1985. Vol. 87. Pp. 179–196.

79. *Rogowsky D.M., MacGregor J.G., Ong S.Y.* Tests of reinforced concrete deep beams // *ACI Journal Proceedings*. 1986. Vol. 83. Issue 4. DOI: 10.14359/10558

80. *Ahmad S.H., Lue D.* Flexure-shear interaction of reinforced high strength concrete beams // *ACI Structural Journal*. 1987. Vol. 84. Issue 4. Pp. 330–341. DOI: 10.14359/1662

81. *Lehwalter N.* Bearing Capacity of Concrete Compression Struts in Truss Systems, Exemplified by the Case of Short Beams : PhD thesis. Darmstadt, 1988.
82. *Walraven J., Lehwalter N.* Size effects in short beams loaded in shear // *ACI Structural Journal*. 1994. Vol. 91. Issue 5. Pp. 585–593. DOI: 10.14359/4177
83. *Tan K.-H., Kong F.-K., Teng S., Guan L.* High-strength concrete deep beams with effective span and shear span variations // *ACI Structural Journal*. 1995. Vol. 92. Issue 4. Pp. 395–405. DOI: 10.14359/991
84. *Tan K., Lu H.* Shear behavior of large reinforced concrete deep beams and code comparisons // *ACI Structural Journal*. 1999. Vol. 96. Issue 5. Pp. 836–845. DOI: 10.14359/738
85. *Pendyala R.S., Mendis P.* Experimental study on shear strength of high-strength concrete beams // *ACI Structural Journal*. 2000. Vol. 97. Issue 4. Pp. 564–571. DOI: 10.14359/7421
86. *Oh J.-K., Shin S.-W.* Shear strength of reinforced high-strength concrete deep beams // *ACI Structural Journal*. 2001. Vol. 98. Issue 2. Pp. 164–173. DOI: 10.14359/10184
87. *Lertsrisakulrat T., Niwa J., Yanagawa A., Matsuo M.* Concept of concrete compressive fracture energy in RC deep beams without transverse reinforcement // *Transactions of the Japan Concrete Institute*. 2002. Vol. 23. Pp. 119–124.
88. *Yang K.-H., Chung H.-S., Lee E.-T., Eun H.-C.* Shear characteristics of high-strength concrete deep beams without shear reinforcements // *Engineering Structures*. 2003. Vol. 25. Issue 10. Pp. 1343–1352. DOI: 10.1016/s0141-0296(03)00110-x
89. *Tan K., Cheng G., Cheong H.* Size effect in shear strength of large beams — behaviour and finite element modelling // *Magazine of Concrete Research*. 2005. Vol. 57. Issue 8. Pp. 497–509. DOI: 10.1680/mac.2005.57.8.497
90. *Zhang N., Tan K.-H.* Size effect in RC deep beams: Experimental investigation and STM verification // *Engineering structures*. 2007. Vol. 29. Issue 12. Pp. 3241–3254. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.10.005
91. *Tan K.-H., Cheng G.-H., Zhang N.* Experiment to mitigate size effect on deep beams // *Magazine of Concrete Research*. 2008. Vol. 60. Issue 10. Pp. 709–723. DOI: 10.1680/mac.2007.00030
92. *Kong F.-K., Robins P.J., Cole D.F.* Web reinforcement effects on deep beams // *ACI Journal Proceedings*. 1970. Vol. 67. Issue 12. Pp. 1010–1017. DOI: 10.14359/7336
93. *Subedi N., Vardy A.E., Kubotat N.* Reinforced concrete deep beams some test results // *Magazine of Concrete Research*. 1986. Vol. 38. Issue 137. Pp. 206–219. DOI: 10.1680/mac.1986.38.137.206
94. *Tan K.-H., Kong F.-K., Teng S., Weng L.-W.* Effect of web reinforcement on high-strength concrete deep beams // *ACI Structural Journal*. 1997. Vol. 94. Issue 5. Pp. 572–581. DOI: 10.14359/506
95. *Foster S.J., Gilbert R.I.* Experimental Studies on High-Strength Concrete Deep Beams // *ACI Structural Journal*. 1998. Vol. 95. Issue 4. Pp. 382–390. DOI: 10.14359/554
96. *Ozbolt J., Eligehausen R.* Size effect in concrete and concrete structures // *Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-2*. 1995. Pp. 665–674.
97. *Бударин А.М., Ушаков О.Ю., Сабитов Л.С.* Численное исследование влияния масштабного эффекта на продавливание толстых железобетонных плит // *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. 2025. № 1 (64). С. 72–79. DOI: 10.25628/UNIIP.2025.64.1.029. EDN SGYBOH.

Поступила в редакцию 22 июля 2025 г.

Принята в доработанном виде 13 января 2026 г.

Одобрена для публикации 17 января 2026 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Сергей Алексеевич Зенин** — кандидат технических наук, заведующий лабораторией теории железобетона и конструктивных систем; **Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»;** 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6; РИНЦ ID: 326794, Scopus: 6603820715, ResearcherID: LRV-1545-2024, ORCID: 0009-0004-5304-8507; lab01@mail.ru;

**Александр Михайлович Бударин** — главный специалист отдела расчетных обоснований; **Институт Гидропроект;** 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2; alex.budarin01@gmail.com;

**Евгений Александрович Редикульцев** — аспирант; **Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ);** 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19; e.a.redikultsev@urfu.ru.

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

1. Leonhardt F., Walther R. The Stuttgart Shear Tests. *CACA Translation*. 1961; 111(28):134.
2. Jin-Keun K., Yon-Dong P. Shear strength of reinforced high strength concrete beam without web reinforcement. *Magazine of Concrete Research*. 1994; 46(166):7-16. DOI: 10.1680/mac.1994.46.166.7
3. Kani G.N.J. How safe are our large reinforced concrete beams? *ACI Journal Proceedings*. 1967; 64(3). DOI: 10.14359/7549
4. Zalesov A.S., Klimov Yu.A. *Strength of reinforced concrete structures under the action of shear forces*. Kyiv, Budivelnik, 1989; 104. (rus.).
5. Cagnis F., Fernández Ruiz M., Muttoni A. Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: An analysis of the critical shear crack development on the basis of test results. *Engineering Structures*. 2015; 103:157-173. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.09.015
6. Bažant Z., Planas J. *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*. Boca Raton, C.R. C., 2019. DOI: 10.1201/9780203756799
7. Borishansky M.S. *Calculation of bent rods and clamps in bending reinforced concrete elements by failure stage*. Moscow, State Publishing House of Construction Literature, 1946; 78. (rus.).
8. Borishansky M.S. Calculation of reinforced concrete elements under the action of shear forces. *Publishing House of Construction Literature*. 1964; 122-143. (rus.).
9. Gvozdev A.A. *Calculation of bearing capacity of structures by the method of limit equilibrium*. Moscow, State Publishing House of Construction Literature, 1949; 280. (rus.).
10. Zalesov A.S. New method of calculating the strength of reinforced concrete elements by inclined sections. *Calculation and Design of Reinforced Concrete Structures : Proceedings of the Institute*. 1977; 39:16-28. (rus.).
11. Zalesov A.S., Ilyin O.F. Experience of building a new theory of beam strength in the zone of action of transverse forces. *New about strength of reinforced concrete*. Moscow, Stroyizdat, 1977; 115-140. (rus.).
12. Toryanik M.S., Mitrofanov V.P. Strength and Deformations of Reinforced Concrete Beams Failing by Inclined Crack. *Concrete and Reinforced Concrete*. 1970; 2:39-41. (rus.).
13. Ilyin O.F. *Investigation of Reinforced Concrete Beams of High-Strength Concrete under the Action of shear forces : abstract of dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 1973; 22. (rus.).
14. Levenberg K. A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. *Quarterly of Applied Mathematics*. 1944; 2(2):164-168. DOI: 10.1090/qam/10666
15. Marquardt D.W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 1963; 11(2):431-441. DOI: 10.1137/0111030
16. Polskoy P.P. *Strength and crack resistance of inclined sections of bending reinforced concrete elements at different types of concrete and section shapes : dis. ... cand. tech. sci*. Rostov-on-Don, 1998; 262. (rus.).
17. Ignatavičius S. *Investigation of strength of reinforced concrete rectangular and T-beams by inclined cross section : dis. ... cand. tech. sci*. Vilnius, 1973. (rus.).
18. Sheina S.G. *Strength and fracture resistance of inclined sections of reinforced concrete elements under the joint action of longitudinal compressive and transverse forces : dis. ... cand. tech. sci*. Rostov-on-Don, 1984. (rus.).
19. Silantiev A.C. *Resistance of Bending Reinforced Concrete Elements in Inclined Sections Taking into Account the Influence of Longitudinal Reinforcement : dis. ... cand. tech. sci*. Moscow, 2012; 257. EDN SUPMOP. (rus.).
20. Cagnis F., Fernández Ruiz M., Muttoni A. An analysis of the shear-transfer actions in reinforced concrete members without transverse reinforcement based on refined experimental measurements. *Structural Concrete*. 2017; 19(1):49-64. DOI: 10.1002/suco.201700145
21. Ismai K.S. *Shear Behaviour of Reinforced Concrete Deep Beams : Ph.D. Thesis*. Sheffield, 2016.
22. Diaz de Cossio R., Siess C.P. Behavior and strength in shear of beams and frames without web reinforcement. *ACI Journal Proceedings*. 1960; 56(2):695-735. DOI: 10.14359/8118
23. Joergensen H.B., Hoang L.C., Fabrin L.S., Maagaard J. Influence of High Axial Tension on the Shear Strength of non-shear RC Beams. *IABSE Reports*. 2013; 99:86-87. DOI: 10.2749/222137813806474309
24. Kuhlmann U., Zilch K., Ehmann J., Jähring A., Spitra F. Querkraftabtragung in Verbundträgern mit schlaff bewehrter und aus Zugbeanspruchung gerissener Stahlbetonplatte ohne Schubbewehrung. *Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf*. Institut für Konstruktion und Entwurf Stahl-, Holz-, und Verbundbau, 2002; 109.
25. Madsen M.B., Hansen S., Hoang L.C., Maagaard J. N-V Interaction in Reinforced Concrete Elements without Stirrups. *Procedia Engineering*. 2011; 14:2511-2518. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.07.316
26. Mattock A.H. Diagonal tension cracking in concrete beams with axial forces. *Journal of the Structural Division*. 1969; 95(9):1887-1900. DOI: 10.1061/jsdeag.0002353
27. Acevedo A.B., Bentz E.C., Collins M.P. *Influence of Clamping Stresses on the Shear Strength of Con-*

crete Slabs under Uniform Loads. Research Report No. ROSE-2008/0.5. 2008; 227.

28. Aoyagi Y., Endo T. Ultimate Shear Capacity of Continuous RC Beams Subjected to Distributed Loading. *Fourth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*. 1993; 727-732.

29. Dassow N.A. *Effect of Uniform Load on the Shear Strength of Slender Beams without Shear Reinforcement : master's thesis*. Austin, University of Texas at Austin, 2014.

30. Feldman A., Siess C.P. Effect of Moment-Shear Ratio on Diagonal Tension Cracking and Strength in Shear of Reinforced Concrete Beams. University of Illinois Engineering Experiment Station. *College of Engineering*. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1955.

31. Klein J.R. *Behavior of Slender Beams without Stirrups: Effects of Load Distribution and Member Depth : master's thesis*. Austin, University of Texas at Austin, 2015.

32. Krefeld W.J., Thurston C.W. Studies of the Shear and Diagonal Tension Strength of Simply Supported Reinforced Concrete Beams. *ACI Journal Proceedings*. 1966; 63(4):451-476. DOI: 10.14359/7633

33. Leonhardt F., Walther R. *Schubversuche an ein-feldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung*. *DAfStb Heft 151 Hrsg.* Berlin, Ernst & Sohn, 1962.

34. Rüschi H., Haugli F.R., Mayer H. *Schubversuche an Stahlbeton Rechteckbalken mit Gleichmassig Verteilter Belastung*, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 145. West Berlin, W. Ernst und Sohn, 1962.

35. Shioya T., Iguro M., Nojiri Y., Akiyama H., Okada T. *Shear strength of large reinforced concrete beams*. Special Publication, 1990; 118:259-280.

36. Smith R.B.L. Shear reinforcement of reinforced concrete beams subject to distributed loading. *Magazine of Concrete Research*. 1970; 22(70):17-24. DOI: 10.1680/mac.1970.22.70.17

37. Uzel A., Podgorniak B., Bentz E.C., Collins M.P. Design of Large Footings for One-Way Shear. *ACI Structural Journal*. 2011; 108(2):131-138. DOI: 10.14359/51664247

38. Campana S., Fernández Ruiz M., Anastasi A., Muttoni A. Analysis of shear-transfer actions on one-way RC members based on measured cracking pattern and failure kinematics. *Magazine of Concrete Research*. 2013; 65(6):386-404. DOI: 10.1680/mac.12.00142

39. Huber P., Huber T., Kollegger J. Investigation of the shear behavior of RC beams on the basis of measured crack kinematics. *Engineering Structures*. 2016; 113:41-58. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.01.025

40. Yoon Y.-S., Cook W.D., Mitchell D. Minimum Shear Reinforcement in Normal, Medium, and High-Strength Concrete Beams. *ACI Structural Journal*. 1996; 93(5):576-584. DOI: 10.14359/9716

41. Ghannoum W.M. *Size effect on shear strength of reinforced concrete beams : master's thesis*. Montreal, McGill University, 1998.

42. Clark A.P. Diagonal tension in reinforced concrete beams. *ACI Journal Proceedings*. 1951; 48(10). DOI: 10.14359/11876

43. Laupa A., Siess C.P., Newmark N.M. The shear strength of simple-span reinforced concrete beams without web reinforcement. Report DA-49-129-eng-248. *University of Illinois Engineering Experiment Station, College of Engineering*. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1953.

44. Moody K., Viest I., Elstner R., Hognestad E. Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Part 1-Tests of Simple Beams. *ACI Journal Proceedings*. 1954; 51(12). DOI: 10.14359/11680

45. Moody K., Viest I., Elstner R., Hognestad E. Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Part 2-Tests of Restrained Beams Without Web Reinforcement. *ACI Journal Proceedings*. 1955; 51(1):417-434. DOI: 10.14359/11686

46. Ferguson P.M. Some implications of recent diagonal tension tests. *ACI Journal Proceedings*. 1956; 53(8):157-172. DOI: 10.14359/11507

47. Morrow J., Viest I.M. Shear Strength of Reinforced Concrete Frame Members Without Web Reinforcement. *ACI Journal Proceedings*. 1957; 53(3):833-869. DOI: 10.14359/11558

48. Chang T.S., Kesler C.E. Static and fatigue strength in shear of beams with tensile reinforcement. *ACI Journal Proceedings*. 1958; 54(6):1033-1058. DOI: 10.14359/11493

49. Rodriguez J.J., Bianchini A.C., Viest I.M., Kesler C.E. Shear Strength of Two-Span Continuous Reinforced Concrete Beams. *ACI Journal Proceedings*. 1959; 55(4). DOI: 10.14359/11409

50. Sozen M.A., Zwoyer E., Siess C.P. Investigation of prestressed concrete for highway bridges: Part I strength in shear of beams without web reinforcement. University of Illinois. *Engineering Experiment Station*. Bulletin no. 452. 1959.

51. Mathey R.G., Watstein D. Shear strength of beams without web reinforcement containing deformed bars of different yield strengths. *ACI Journal Proceedings*. 1963; 60(2):183-208. DOI: 10.14359/7851

52. Rajagopalan K.S., Ferguson P.M. Exploratory shear tests emphasizing percentage of longitudinal steel. *ACI Journal Proceedings*. 1968; 65(8):634-638. DOI: 10.14359/7501

53. Bhal N.S. *Über den Einfluss der Balkenhöhe auf die Schubtragfähigkeit von einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung : PhD Thesis*. Stuttgart, 1967.

54. Taylor H.P. Shear stresses in reinforced concrete beams without shear reinforcement. *Technical Report TRA 407*. Cement and Concrete Association, 1968.

55. Aster H., Koch R. Schubtragfähigkeit dicker Stahlbetonplatten. *Beton-U Stalnbetonbau*. 1974; 69(11).
56. Thorenfeldt E., Drangsholt G. Shear capacity of reinforced high-strength concrete beams. *ACI Special Publication*. 1990; 121:129-154.
57. Jin-Keun K., Yon-Dong P. Shear strength of reinforced high strength concrete beam without web reinforcement. *Magazine of Concrete Research*. 1994; 46(166):7-16. DOI: 10.1680/mac.1994.46.166.7
58. Kong P.Y., Rangan B.V. Shear strength of high-performance concrete beams. *ACI Structural Journal*. 1998; 95(6):677-688. DOI: 10.14359/581
59. Kawano H., Watanabe H. Shear strength of reinforced concrete columns effect of specimen size and load reversal. *Proceedings of the Second Italy-Japan Workshop on Seismic Design and Retrofit of Bridges*. 1997; 141-154.
60. Collins M.P., Kuchma D. How safe are our large, lightly reinforced concrete beams, slabs, and footings? *ACI Structural Journal*. 1999; 96(4):473-481. DOI: 10.14359/684
61. Adebar P. One-way shear strength of large footings. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2000; 27(3):553-562. DOI: 10.1139/100-008
62. Angelakos D., Bentz E.C., Collins M.P. Effect of concrete strength and minimum stirrups on shear strength of large members. *ACI Structural Journal*. 2001; 98(3):290-300. DOI: 10.14359/10220
63. Cao S. *Size effect and the influence of longitudinal reinforcement on the shear : master's thesis*. Toronto, University of Toronto, 2001.
64. Lubell A.S. *Shear in wide reinforced concrete members : Ph.D. Thesis*. Toronto, 2006.
65. Seliem H., Hosny A., Dwairi H., Rizkalla S. Shear behavior of concrete beams reinforced with MMFX steel without web reinforcement. *NC State University Final Report, Project No. IS-06-08*. 2006.
66. Sherwood E.G., Lubell A.S., Bentz E.C., Collins M.P. One-way shear strength of thick slabs and wide beams. *ACI Structural Journal*. 2006; 103(6):794-802. DOI: 10.14359/18229
67. Smith K., Vantsiotis A. Shear strength of deep beams. *ACI Journal Proceedings*. 1982; 79(3):201-213. DOI: 10.14359/10899
68. Roller J.J., Russel H.G. Shear strength of high-strength concrete beams with web reinforcement. *ACI Structural Journal*. 1990; 87(2):191-198. DOI: 10.14359/2682
69. Xie Y., Ahmad S.H., Yu T., Hino S., Chung W. Shear ductility of reinforced concrete beams of normal and high-strength concrete. *ACI Structural Journal*. 1994; 91(2):140-149. DOI: 10.14359/4592
70. Shin S.W., Lee K.S., Moon J.I., Ghosh S. Shear strength of reinforced high-strength concrete beams with shear span-to-depth ratios between 1.5 and 2.5. *ACI Structural Journal*. 1999; 96(4). DOI: 10.14359/691
71. Yoshida Y. *Shear reinforcement for large lightly reinforced concrete members : master's thesis*. Toronto, University of Toronto, 2000.
72. Rahal K.N., Al-Shaleh K.S. Minimum transverse reinforcement in 65 MPa concrete beams. *ACI Structural Journal*. 2004; 101(6):872-878. DOI: 10.14359/13463
73. Cladera A., Mari A.R. Experimental study on high-strength concrete beams failing in shear. *Engineering Structures*. 2005; 27(10):1519-1527. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.04.010
74. Watstein D., Mathey R.G. Strains in beams having diagonal cracks. *ACI Journal Proceedings*. 1958; 55(12):717-728. DOI: 10.14359/11384
75. De Paiva H.R., Siess C.P. Strength and behavior of deep beams in shear. *Journal of the Structural Division*. 1965; 91(5):19-41. DOI: 10.1061/JSDEAG.0001329
76. Ramakrishnan V., Ananthanarayana Y. Ultimate strength of deep beams in shear. *ACI Journal Proceedings*. 1968; 65(2). DOI: 10.14359/7458
77. Manuel R. Failure of deep beams. *ACI Special Publication*. 1974; 42:15.
78. Mphonde A.G., Frantz G.C. Shear tests of high- and low-strength concrete. *ACI Special Publication*. 1985; 87:179-196.
79. Rogowsky D.M., MacGregor J.G., Ong S.Y. Tests of reinforced concrete deep beams. *ACI Journal Proceedings*. 1986; 83(4). DOI: 10.14359/10558
80. Ahmad S.H., Lue D. Flexure-shear interaction of reinforced high strength concrete beams. *ACI Structural Journal*. 1987; 84(4):330-341. DOI: 10.14359/1662
81. Lehwalter N. *Bearing Capacity of Concrete Compression Struts in Truss Systems, Exemplified by the Case of Short Beams : PhD thesis*. Darmstadt, 1988.
82. Walraven J., Lehwalter N. Size effects in short beams loaded in shear. *ACI Structural Journal*. 1994; 91(5):585-593. DOI: 10.14359/4177
83. Tan K.-H., Kong F.-K., Teng S., Guan L. High-strength concrete deep beams with effective span and shear span variations. *ACI Structural Journal*. 1995; 92(4):395-405. DOI: 10.14359/991
84. Tan K., Lu H. Shear behavior of large reinforced concrete deep beams and code comparisons. *ACI Structural Journal*. 1999; 96(5):836-845. DOI: 10.14359/738
85. Pendyala R.S., Mendis P. Experimental study on shear strength of high-strength concrete beams. *ACI Structural Journal*. 2000; 97(4):564-571. DOI: 10.14359/7421
86. Oh J.-K., Shin S.-W. Shear strength of reinforced high-strength concrete deep beams. *ACI Structural Journal*. 2001; 98(2):164-173. DOI: 10.14359/10184
87. Lertsrisakulrat T., Niwa J., Yanagawa A., Matsuo M. Concept of concrete compressive fracture energy in RC deep beams without transverse reinforcement. *Transactions of the Japan Concrete Institute*. 2002; 23:119-124.

88. Yang K.-H., Chung H.-S., Lee E.-T., Eun H.-C. Shear characteristics of high-strength concrete deep beams without shear reinforcements. *Engineering Structures*. 2003; 25(10):1343-1352. DOI: 10.1016/s0141-0296(03)00110-x
89. Tan K., Cheng G., Cheong H. Size effect in shear strength of large beams — behaviour and finite element modelling. *Magazine of Concrete Research*. 2005; 57(8):497-509. DOI: 10.1680/mac.2005.57.8.497
90. Zhang N., Tan K.-H. Size effect in RC deep beams: Experimental investigation and STM verification. *Engineering Structures*. 2007; 29(12):3241-3254. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.10.005
91. Tan K.-H., Cheng G.-H., Zhang N. Experiment to mitigate size effect on deep beams. *Magazine of Concrete Research*. 2008; 60(10):709-723. DOI: 10.1680/mac.2007.00030
92. Kong F.-K., Robins P.J., Cole D.F. Web reinforcement effects on deep beams. *ACI Journal Proceedings*. 1970; 67(12):1010-1017. DOI: 10.14359/7336
93. Subedi N., Vardy A.E., Kubotat N. Reinforced concrete deep beams some test results. *Magazine of Concrete Research*. 1986; 38(137):206-219. DOI: 10.1680/mac.1986.38.137.206
94. Tan K.-H., Kong F.-K., Teng S., Weng L.-W. Effect of web reinforcement on high-strength concrete deep beams. *ACI Structural Journal*. 1997; 94(5):572-581. DOI: 10.14359/506
95. Foster S.J., Gilbert R.I. Experimental Studies on High-Strength Concrete Deep Beams. *ACI Structural Journal*. 1998; 95(4):382-390. DOI: 10.14359/554
96. Ozbolt J., Eligehausen R. Size effect in concrete and concrete structures. *Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-2*. 1995; 665-674.
97. Budarin A., Ushakov O., Sabitov L. Numerical investigation of the size effect influence on punching shear capacity of thick reinforced concrete slabs. *Akademicheskie Vestnik UralNIIProekt RAASN*. 2025; 1(64):72-79. DOI: 10.25628/UNIIP.2025.64.1.029. EDN SGYBOH. (rus.).

Received July 22, 2025.

Adopted in revised form on January 13, 2026.

Approved for publication on January 17, 2026.

**B I O N O T E S :** **Sergei A. Zenin** — Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Theory of Reinforced Concrete and Structural Systems; **Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev of Research Center for Construction**; 6, 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; ID RSCI: 326794, Scopus: 6603820715, ResearcherID: LRV-1545-2024, ORCID: 0009-0004-5304-8507; lab01@mail.ru;

**Alexander M. Budarin** — chief specialist of the Department of Calculation Justifications; **Institute Hydroproject**; 2 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; alex.budarin01@gmail.com;

**Evgeny A. Redikultsev** — postgraduate student; **Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU)**; 19 Mira st., Yekaterinburg, 620002, Russian Federation; e.a.redikultsev@urfu.ru.

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

## Определение фактического численного значения величины горизонтальной поперечной нагрузки от удара транспортного средства о бетонное парапетное дорожное ограждение

Ирина Вадимовна Демьянушко, Илья Анатольевич Карпов,  
Алексей Геннадьевич Локить

Московский автомобильно-дорожный государственный  
технический университет (МАДИ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** При проектировании мостов и путепроводов обязательно надо учитывать горизонтальную поперечную нагрузку от удара транспортного средства (ТС) об ограждение. В РФ данная нагрузка регламентирована п. 6.19 СП 35.13330.2011 и для железобетонных парапетных ограждений составляет 165,2 кН. Данное значение нагрузки было введено СНиП 2.05.03–84 (ред. 1986 г.) и с тех пор не обновлялось. Анализ зарубежных норм (США и ЕС) показал, что в РФ нагрузка в 3–5 раз ниже, чем в других странах, в связи с чем решено провести настоящее исследование.

**Материалы и методы.** Удар ТС о парапетное ограждение — динамически нелинейная контактная задача взаимодействия двух тел. Наиболее эффективным методом решения подобного рода задач являются виртуальные цифровые испытания. Использовался программный комплекс ANSYS LS-DYNA. Параметры испытаний определялись соответствующими нормативно-техническими нормами и правилами РФ. Валидация моделей проводилась на основе данных натурных испытаний, выполненных в НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ», а верификация — по энергетическому балансу, сходимости и сопоставлению полученного значения силы удара с аналитическими решениями, рассмотренными в работе.

**Результаты.** Путем виртуальных цифровых испытаний определены фактические численные значения величины приведенной горизонтальной поперечной динамической нагрузки от удара ТС о парапетное дорожное ограждение для удерживающих способностей У1–У10 по ГОСТ 33128–2024, ГОСТ 33129–2024.

**Выводы.** Установлено, что реальное значение нагрузки от удара ТС о парапетное ограждение значительно больше, чем в п. 6.19 СП 35.13330.2011. Это приводит к тому, что мостовые конструкции ограждений проектируются в настоящее время с недостаточным запасом по прочности. Проведенные исследования показывают, что необходима актуализация нормативно-технической документации РФ в области парапетных ограждений, а также сооружений, на которых ограждения эксплуатируются.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** временные нагрузки, горизонтальная поперечная динамическая нагрузка от удара ТС, парапетные мостовые ограждения, удерживающая способность ограждения, виртуальные испытания, натурные полномасштабные испытания, валидация, верификация, численные методы строительной механики, МКЭ, LS-DYNA

*Благодарности.* Авторы выражают искреннюю благодарность коллегам из ООО «Институт «Мосинжпроект» за помощь в проведении исследований. Работа выполнена при содействии Федерального дорожного агентства (Росавтодор) и Фонда содействия инновациям (№ 47ГРТЦС10-D5/56182).

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Демьянушко И.В., Карпов И.А., Локить А.Г. Определение фактического численного значения величины горизонтальной поперечной нагрузки от удара транспортного средства о бетонное парапетное дорожное ограждение // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 3. С. 350–372. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.350-372

Автор, ответственный за переписку: Алексей Геннадьевич Локить, algenlok@mail.ru.

## Determination of the actual value of horizontal transverse load from vehicle impact on a concrete parapet road barrier

Irina V. Demiyanshko, Ilya A. Karpov, Alexey G. Lokit

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** In bridge and overpass design, the transverse (lateral) load from a vehicle impact on the safety barrier must be accounted for. In the Russian Federation, p. 6.19 of CP 35.13330.2011 specifies a constant value of 165.2 kN for concrete barriers — a value originating from SNiP 2.05.03–84 (1986) and not revised since. A review of U.S. and EU provisions shows that comparable design loads are approximately 3–5 times higher, motivating the present study.

**Materials and methods.** A vehicle–barrier impact is a dynamically nonlinear contact problem between two deformable bodies. The most effective approach is virtual crash testing. We employed ANSYS LS-DYNA; test parameters (vehicle mass,

speed, impact angle) were set per current Russian standards. Model validation used full-scale test data from NAMI. Solution verification included energy balance checks, mesh/time-step convergence, and comparison of impact force metrics with analytical estimates discussed in the paper.

**Results.** Virtual simulations yielded numerical values of the equivalent transverse dynamic load from vehicle impact on a concrete barrier for retention levels Y1–Y10 in accordance with GOST 33128–2024 and GOST 33129–2024.

**Conclusion.** The actual impact loads substantially exceed the value prescribed by p. 6.19 of SP 35.13330.2011, leading to insufficient safety margins in current barrier and connection designs on bridges. The findings indicate the need to update the Russian regulatory framework for concrete barriers and for the structures on which they are installed, linking design loads to retention level and impact scenario and allowing the use of verified virtual crash testing results.

**KEYWORDS:** temporary loads, horizontal (lateral) transverse dynamic load from a vehicle impact on a concrete bridge barrier, concrete bridge barriers, barrier containment level, virtual tests, full-scale tests, validation, verification, numerical methods of structural mechanics, FEM, LS-DYNA

**Acknowledgements.** The authors express their sincere gratitude to our colleagues at Mosinzhprouekt Institute LLC for their assistance with this research. This work was carried out with the support of the Federal Road Agency (Rosavtodor) and the Innovation Promotion Foundation (Grant No. 47GRTTS10-D5/56182).

**FOR CITATION:** Demiyannushko I.V., Karpov I.A., Lokit A.G. Determination of the actual value of horizontal transverse load from vehicle impact on a concrete parapet road barrier. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(3):350-372. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.350-372 (rus.).

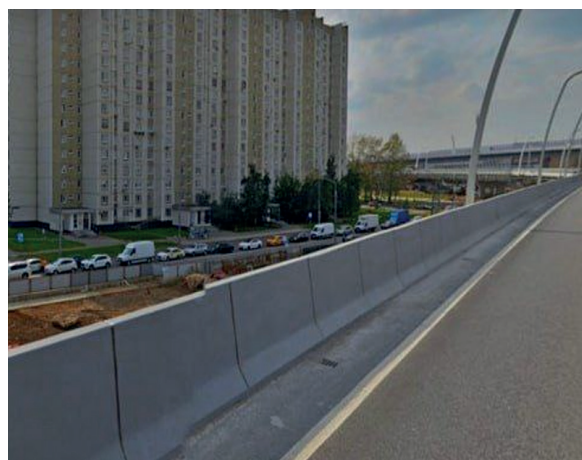
*Corresponding author:* Alexey G. Lokit, algenlok@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей в области проектирования и строительства искусственных сооружений на автомобильных дорогах является обеспечение безопасности людей в процессе эксплуатации сооружения [1–6]. Для этого на стадии проектирования необходимо применять актуальные расчетные схемы и нагрузки, адекватно отражающие реальные условия работы конструкций, что обеспечивает их надежность. Согласно требованиям нормативно-технических документов при проектировании и расчете дорожных ограждений на мостах и путепроводах следует учитывать горизонтальную поперечную нагрузку от ударов подвижного состава об ограждение. На мостах могут использоваться барьерные [7] и парапетные ограждения безопасности [8]. Последние рассматриваются в настоящем исследовании (рис. 1).

Горизонтальная поперечная нагрузка от удара транспортного средства (ТС) о парапетное бетонное

ограждение в нормативно-технических документах РФ регламентируется в п. 6.19 СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» и составляет для железобетонных парапетных ограждений 165,2 кН (16,52 т). Она схематизируется в виде равномерно распределенной на длине 1 м нагрузки, приложенной к ограждению на уровне 2/3 высоты ограждения от поверхности проезда (см. рис. 4, а). Данное значение нагрузки было введено в 1986 г. в СНиП 2.05.03–84 и с тех пор никак не актуализировалось, хотя состав транспортного потока, скорости автомобилей и интенсивность движения за прошедшие десятилетия кардинально изменились. В РФ основные нормативно-технические документы, регламентирующие требования к боковым дорожным ограждениям безопасности, а также методы их испытаний и критерии приемки изложены в ГОСТ 33128 и ГОСТ 33129. В этих стандартах установлены уровни удерживающей способности (от У1 (130 кДж) до У106 (724 кДж)) и приведены параметры наезда ТС (скорость, масса, угол



a



b

Рис. 1. Парапетные бетонные боковые дорожные ограждения безопасности

Fig. 1. Concrete road safety barrier

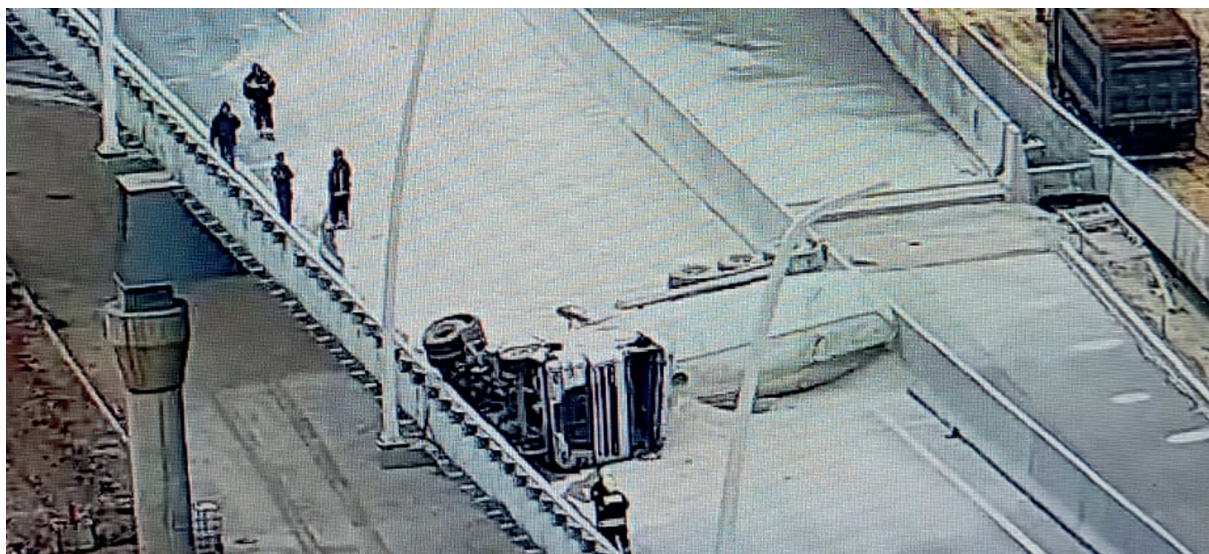


Рис. 2. Результаты удара грузового автомобиля о парапетное мостовое ограждение на эстакаде

Fig. 2. Results of a heavy truck collision with bridge concrete barrier

и т.д.). При этом значение расчетной нагрузки от удара ТС об ограждение в данных стандартах не приведено. Важно отметить отсутствие согласованной связи между СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» и ГОСТ 33128/33129. В практике расчета мостов и путепроводов проектировщики, как правило, принимают нормативную горизонтальную поперечную нагрузку от ударов ТС о парапетное ограждение по п. 6.19 СП 35.13330.2011 (165,2 кН) для любого уровня удерживающей способности ограждения. Некорректность такого подхода демонстрирует простой пример. В соответствии с ГОСТ 33129–2024 ограждение с уровнем удерживающей способности У1 (самый минимальный возможный уровень, соответствующий энергии удара 130 кДж) должно выдерживать наезд автобуса массой 12 т со скоростью 50 км/ч под углом в 20°, а ограждение с уровнем удерживающей способности У106 (самый максимальный возможный уровень) — наезд автопоезда массой 35 т

со скоростью 68 км/ч под углом в 20°. Масса ТС для удерживающей способности У106 в 2,92 раза больше, чем для У1, а скорость в 1,36 раза больше. Не используя положений теории удара, а ограничившись лишь вторым законом Ньютона, легко можно установить, что величина нагрузки от удара ТС об ограждение для удерживающей способности У106 будет минимум в 3 раза больше, чем для У1. Следствием применения при проектировании мостов и путепроводов горизонтальной поперечной нагрузки от ударов подвижного состава, установленной в соответствии с п. 6.19 СП 35.13330.2011 165,2 кН вне зависимости от уровня удерживающей способности ограждения по ГОСТ 33128/33129, является недостаточный запас прочности конструкций и, как следствие, риск повреждения ограждения и элементов пролетного строения при дорожно-транспортных происшествиях (ДТП), вплоть до формирования аварийных ситуаций [9] и угрозы жизни и здоровью лю-

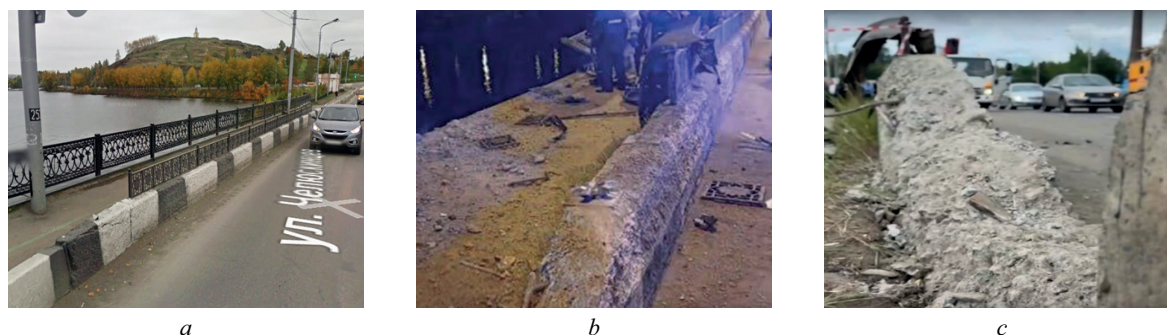


Рис. 3. Результаты столкновения внедорожника с парапетным мостовым ограждением: а — вид до ДТП; б, с — вид после ДТП

Fig. 3. Results of an off-road vehicle collision with bridge concrete barrier: a — photo before road accident; b, c — photo after road accident

дей, что подтверждают реальные случаи. Некоторые из них приведены далее.

Так, в районе Кантемировской улицы на эстакаде МСД (04.10.2024 г.) грузовой автомобиль из-за потери водителем управления врезался в парапетное ограждение, в результате чего в пролетном строении в месте сопряжения плиты пролетного строения и парапетного ограждения образовалась трещина (рис. 2).

На рис. 3 показано разрушенное парапетное ограждение в г. Нижний Тагил в районе плотины, в данном случае внедорожник пробил парапетное ограждение и упал в воду. Погибло 3 человека.

Для анализа современного состояния исследуемой проблемы проведено сравнение отечественных и зарубежных нормативно-технических документов, регламентирующих требования к боковым парапетным дорожным ограждениям безопасности. Перечень данных документов приведен в табл. 1.

В результате было установлено следующее:

1. В нормах США и ЕС между уровнем удерживающей способности ограждения, указанным в AASHTO MASH или EN 1317-1, EN 1317-2, и значением нагрузки от ударов ТС о мостовое ограждение, приведенным в AASHTO LRFD или EN 1991-2 со-

ответственно, в прямом (США) или косвенном (ЕС) виде существует взаимосвязь. В отечественных документах, как уже сказано ранее, данная взаимосвязь отсутствует.

2. Значение горизонтальной поперечной нагрузки от удара ТС о парапетное бетонное ограждение, используемое при расчете мостовых сооружений, по нормам США и ЕС в 3–5 раз больше, чем по требованиям СП 35.13330.2011, действующим в РФ.

3. По требованиям норм США и ЕС также большее значение (в 1,05–1,50 раз) имеет высота приложения нагрузки над уровнем проезжей части.

4. Как следствие 2 и 3 пункта, по нормам США и ЕС на порядок большее значение момента от нагрузки на парапетное ограждение относительно основания ограждения.

5. В соответствии с нормами США и ЕС при расчетах также учитывается вертикальная и горизонтальная продольная нагрузка от удара ТС об ограждение. В отечественных нормах эти нагрузки не учитываются.

Рассмотрим конкретный пример определения в соответствии с нормами РФ, США и ЕС величины горизонтальной поперечной нагрузки от удара ТС

Табл. 1. Нормативно-технические документы в области боковых парапетных ограждений в РФ, США и ЕС

Table 1. Regulatory and technical standards in the field of concrete barriers in Russia, USA and EU

Содержание документа Document content	РФ / RF 	США / USA 	ЕС / EU 
Описание методов испытания боковых ограждений и критериев их приемки Description of the methods for testing side walls and acceptance criteria	ГОСТ 33128/33129 GOST 33128/33129	AASHTO MASH	EN 1317-1 EN 1317-2
Описание нагрузки от ударов ТС о боковое ограждение при расчете искусственных сооружений Description of the load from vehicle impacts on the bridge concrete barrier	СП 35.13330.2011 пункт 6.19 SP 35.13330.2011 p. 6.19	AASHTO LRFD раздел A13.2 AASHTO LRFD section A13.2	EN 1991-2 подпункт 4.7.3.3 EN 1991-2 section 4.7.3.3

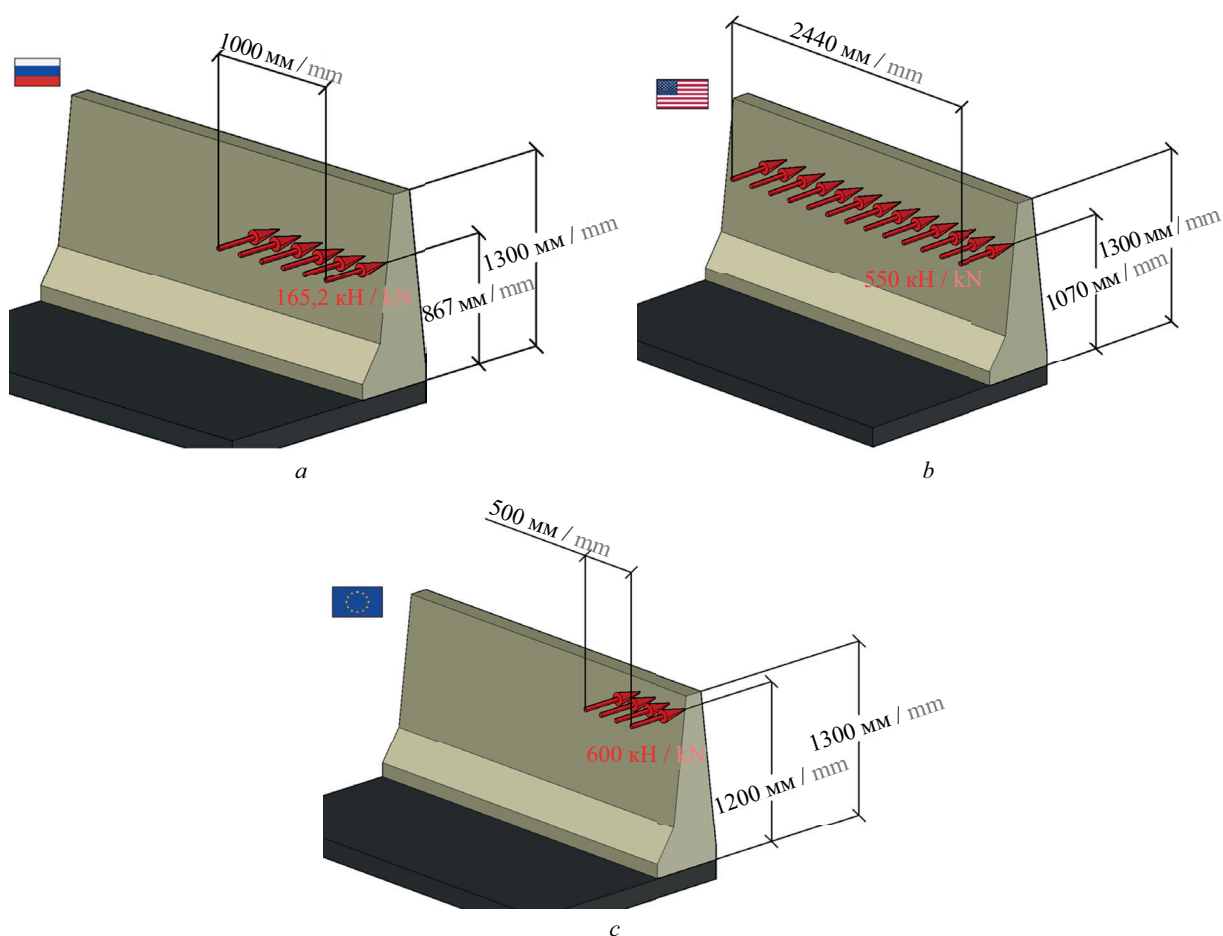




Рис. 4. Расчетная схема нагружения парапетного бетонного мостового ограждения в соответствии с нормами: *a* — РФ; *b* — США; *c* — ЕС

Fig. 4. Calculation scheme of concrete bridge barrier loading in accordance with standards of following countries: *a* — Russia; *b* — USA; *c* — EU

Табл. 2. Сравнение горизонтальной поперечной нагрузки от ударов ТС о парапетное бетонное мостовое ограждение в соответствии с нормами РФ, США и ЕС

Table 2. Comparison of horizontal transverse load from vehicle impacts on concrete bridge barrier in accordance with Russia, US and EU standards

Параметр сравнения Comparison criteria	РФ  СП 35.13330.2011, п. 6.19 RF CP 35.13330.2011 section 6.19	США  AASHTO LRFD раздел A13.2 USA AASHTO LRFD section A13.2	ЕС  EN 1991-2 подпункт 4.7.3.3 EU EN 1991-2 section 4.7.3.3
Значение приведенной нагрузки $F$ , кН Load value $F$ , kN	165,2	550,0	600
Высота приложения нагрузки относительно проезжей части дороги $H$ , мм Load application height $H$ relative to the carriageway, mm	867	1070	1200
Распределение нагрузки по длине $L$ , мм Load distribution by length $L$ , mm	1000	2440	500
Значение момента $M = F \cdot H$ относительно проезжей части, кН·м Value of the moment $M = F \cdot H$ relative to the carriageway, kN·m	143,2	588,5	720

о парапетное бетонное мостовое ограждение, представленное ранее на рис. 2. Схемы приложения погонной нагрузки и величины приведенной показаны на рис. 4 и даны в табл. 2 соответственно.

Исследования процессов взаимодействия ТС и парапетного бетонного ограждения с анализом конструкций парапетных ограждений за рубежом в значительном объеме проводились в США в University of Nebraska-Lincoln, в частности в его структурном подразделении Midwest roadside safety facility (MwRSF) [10–13], а также в Texas A&M Transportation Institute [14–17]. В этих работах было рассмотрено и решено множество задач прикладного характера в области парапетных бетонных ограждений, в том числе в ряде трудов была определена величина нагрузки от удара ТС об ограждение. Информация по результатам исследований, в рамках которых устанавливалось значение горизонтальной поперечной нагрузки от удара ТС о парапетное бетонное ограждение, представлена в табл. 3.

Среди отечественных исследований в области парапетных бетонных ограждений следует отметить работу В.А. Астрова [23], в которой по результатам расчетно-аналитического исследования установлена расчетная величина горизонтальной поперечной нагрузки от удара ТС о парапетное бетонное ограждение, принятая равной 345 кН. Эта работа выполнена в 1990-е гг. (с тех пор состав, скоростной режим и интенсивность движения существенно изменились), а полученное значение было выведено при ряде допущений с использованием корректирующих коэффициентов.

Наиболее эффективным инструментом исследования и анализа высокоскоростных динамических процессов ударного взаимодействия двух и более деформируемых тел являются виртуальные цифровые испытания, основанные на комбинации численных методов строительной механики — метода конеч-

ных элементов (МКЭ) и метода конечных разностей (МКР). За рубежом виртуальные испытания стали основным инструментом при анализе, расчете и проектировании элементов дорожного обустройства, в том числе парапетных дорожных ограждений.

В РФ активное развитие методов цифровых виртуальных испытаний дорожных ограждений началось в МАДИ в 2010 г. под руководством профессора И.В. Демьянушко. Сейчас научная школа МАДИ лидирует в области расчетно-проектировочного анализа элементов дорожной инфраструктуры с применением численных методов строительной механики [24]. Парапетные бетонные ограждения, сегодня все более часто применяемые на мостовых сооружениях, — одно из приоритетных направлений для исследований, результаты которых изложены в настоящей работе.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Процесс ударного взаимодействия ТС с парапетным дорожным ограждением представляет собой динамическую нелинейную задачу строительной механики, включающую в себя контактную задачу соударения двух деформируемых тел. Наиболее эффективный и точный метод решения подобного рода задач — виртуальные цифровые испытания, базирующиеся на численных методах строительной механики, в первую очередь на МКЭ и МКР, которые реализованы в современных программных комплексах (ПК) нелинейной динамики и инженерного анализа (MSC Software, ABAQUS, DYTRAN, HEMP, PAM-SHOCK, RADIOSS, ANSYS LS-DYNA и др.). В рамках данного исследования применялся ПК ANSYS LS-DYNA. Для решения задачи взаимодействия ТС с парапетным бетонным ограждением использовался МКЭ с явной схемой интегрирования

**Табл. 3.** Значения горизонтальной поперечной нагрузки от удара ТС о парапетное бетонное ограждение, полученные в зарубежных исследованиях

**Table 3.** Horizontal transverse load from vehicle impact on concrete barrier, defined in various scientific and technical studies

Автор(ы) исследования Author of research	Значение горизонтальной поперечной нагрузки $F$ от удара ТС об ограждение, кН Value of horizontal transverse load $F$ from vehicle impact on the barrier, kN	Примечание Note
N.M. Sheikh, R.P. Bligh, J.M. Holt [18]	356	Удерживающая способность TL-4 по MASH MASH test level 4(TL-4)
N.M. Sheikh, R.P. Bligh, W.L. Menges [19]	340	Удерживающая способность TL-3 по MASH MASH test level 3(TL-3)
S. Tabacu, N. Pandrea [20]	262	–
A.Y. Abu-Odeh, Kang-Mi Kim, W.W. Williams и соавт. [21]	330	Удерживающая способность TL-4 по MASH MASH test level 4(TL-4)
S.K. Rosenbaugh, R.K. Faller, J. Dixon, A. Loken и соавт. [22]	680	Удерживающая способность TL-4 по MASH MASH test level 4(TL-4)

по времени. Корректность результатов виртуальных испытаний подтверждалась путем валидации виртуальных моделей по данным натурных испытаний, выполненных на испытательных площадках ИЦ НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ».

Для проведения виртуальных испытаний использовались валидированные и верифицированные модели ТС. Некоторые модели ТС были взяты из открытых источников<sup>1</sup>, некоторые разработаны авторами настоящей статьи в ходе научно-исследовательской деятельности [24].

На основании анализа эксплуатирующихся конструкций парапетных бетонных ограждений для выполнения исследования выбрана конструкция монолитного парапетного бетонного ограждения с формой поперечного сечения типа F-профиль, жестко прикрепляемого к основанию. Вид КЭ виртуальной модели данного ограждения показан на рис. 5. Жесткое соединение между ограждением и основанием моделировалось путем введения ограничений (SPC) по шести степеням на узлы КЭ сетки нижнего основания ограждения. Приведенные далее обозначения элементов и других расчетных параметров приняты по конфигурации комплекса ANSYS LS-DYNA<sup>2</sup>.

Блок ограждения моделировался объемными (solid) элементами. В качестве физико-математической модели материала использовался MAT\_001-ELASTIC из библиотеки материалов программы

ANSYS LS-DYNA<sup>3</sup>. Данная модель материала учитывает только упругое поведение материала.

Для моделирования ТС применялись в основном оболочечные (shell) элементы. С целью отдельных частей (двигатель, балласт и т.д.) использовались solid элементы. В качестве физико-математической модели материала для основных элементов конструкции ТС использовался MAT\_024-PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY, учитывающий упругопластическое поведение материала и позволяющий хорошо описывать нелинейные процессы, которые происходят при взаимодействии ТС и ограждения. В качестве основания, по которому движется ТС, при виртуальном моделировании применялась аналитическая абсолютно жесткая контактная поверхность типа RIGIDWALL\_PLANAR. Значение коэффициента трения в контакте (FRIC) между ТС и основанием принималось равным  $FRIC = 0,55$ .

Взаимодействие между ТС и блоком моделировалось с помощью контакта AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE. Значения коэффициентов статического  $F_s$  и динамического  $F_d$  трений принимались соответственно равными  $F_s = 0,4$  и  $F_d = 0,25$ . Параметр (SOFT), определяющий способ вычисления контактной жесткости  $k$ , принимался равным  $SOFT = 2$ , при данном значении контакт определяется между сегментами, а не между узлами, что снижает вероятность «проваливания» контакта. Нормальная контактная сила рассчитывается по следующей формуле:

$$\vec{F}_n = k(\delta_n - \delta_{n0})\vec{n}, \quad (1)$$

<sup>3</sup> ANSYS LS-DYNA. Keyword User's Manual. Volume II: Material Models. R16. Livermore, CA: Livermore Software Technology (Ansys, Inc.); 2025. URL: [https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/2025/04/LS-DYNA\\_Manual\\_Vol\\_II\\_R16.pdf](https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/2025/04/LS-DYNA_Manual_Vol_II_R16.pdf)

<sup>1</sup> National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). Crash Simulation Vehicle Models. Washington, DC : NHTSA. URL: <https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models>

<sup>2</sup> ANSYS LS-DYNA. Keyword User's Manual. Volume III: Multiphysics Solvers. R16. Livermore, CA: Livermore Software Technology (Ansys, Inc.); 2025. URL: [https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/2025/04/LS-DYNA\\_Manual\\_Vol\\_III\\_R16.pdf](https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/2025/04/LS-DYNA_Manual_Vol_III_R16.pdf)

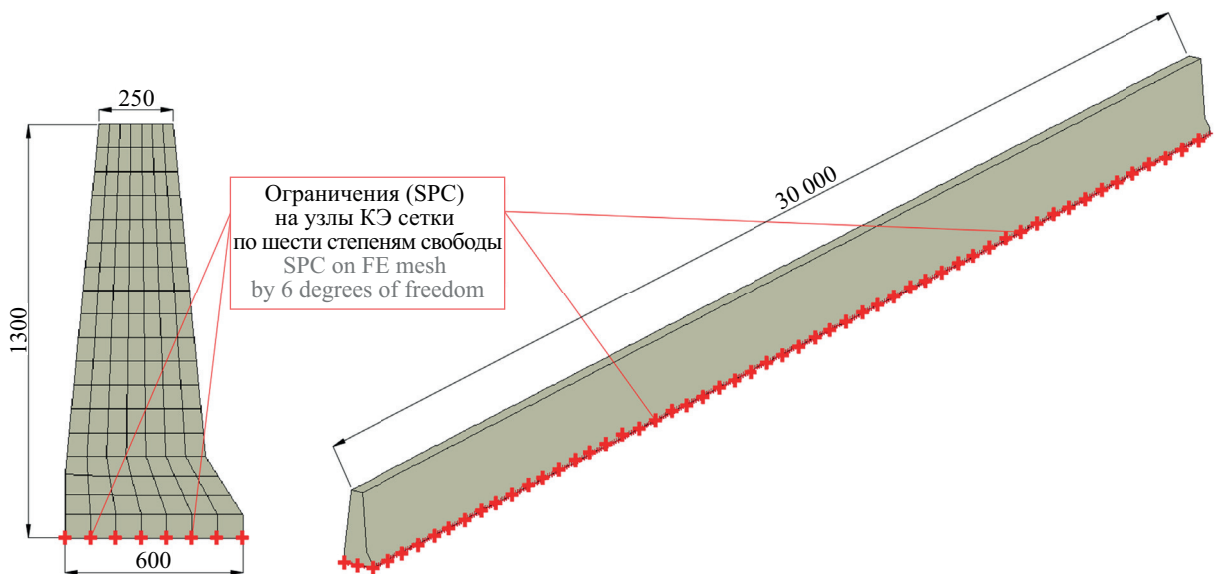


Рис. 5. Виртуальная КЭ модель парапетного ограждения

Fig. 5. Concrete barrier virtual FE model

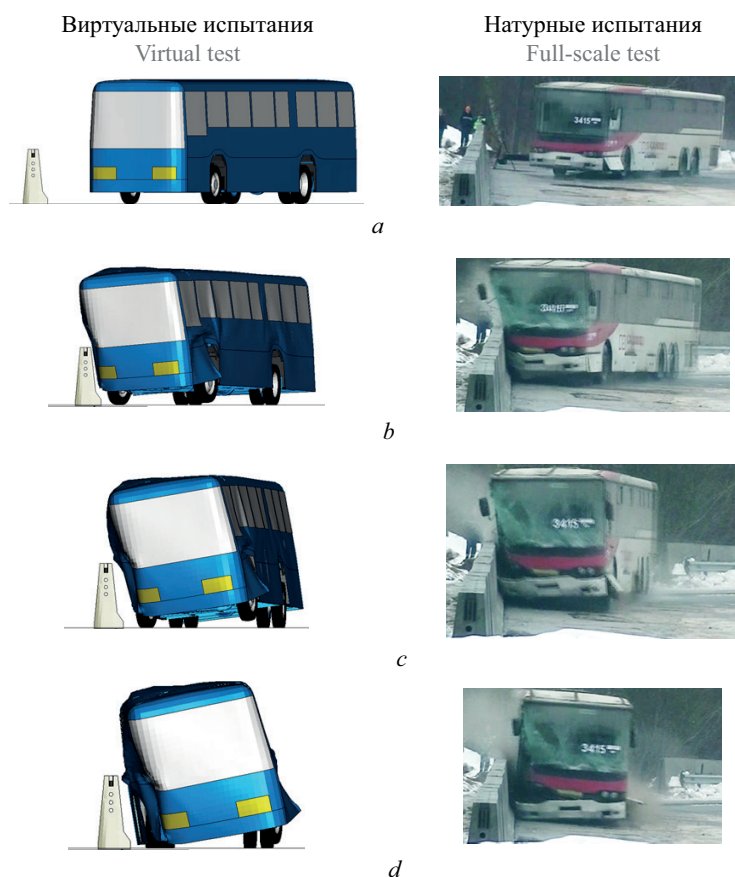


Рис. 6. Сравнение отдельных кадров кинограмм виртуальных и натурных испытаний: *a* — 0,000 с; *b* — 0,345 с; *c* — 0,555 с; *d* — 0,985 с

Fig. 6. Virtual and real tests individual images comparison: *a* — 0.000 s; *b* — 0.345 s; *c* — 0.555 s; *d* — 0.985 s

где  $k$  — штрафная (penalty) контактная жесткость;  $\delta_n$  — текущая глубина проникновения;  $\delta_{n0}$  — начальная глубина проникновения;  $\vec{n}$  — локальная нормаль.

Значение штрафной контактной жесткости  $k$  при SOFT = 2 устанавливается так:

$$k = 0,5 \cdot slsfac \cdot sfs \cdot \left( \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \right) \frac{1}{(dt_c)^2}, \quad (2)$$

где  $slsfac$ ,  $sfs$  — штрафные коэффициенты;  $m_1$ ,  $m_2$  — массы взаимодействующих сегментов;  $dt_c$  — контактный шаг интегрирования.

Перед исследованиями по определению величины нагрузки осуществлены валидация и верификация подготовленной виртуальной модели ТС и ограждения. Валидация выполнялась на основании данных натурных испытаний НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ». Визуальное представление результатов натурных и виртуальных испытаний демонстрируется сравнением отдельных временных кадров кинограмм и представлено на рис. 6, а также в табл. 4.

Верификация виртуальной модели проводилась разработанными способами [25–27] (проверка сходимости по КЭ сетки и шагу по времени, контроль энергетического баланса в системе и т.д.). Результа-

Табл. 4. Сравнение результатов натурных и виртуальных испытаний

Table 4. Virtual and real tests results comparison

Характеристика Parameter	Результаты натурных испытаний Full-scale test result	Результаты виртуальных испытаний Virtual test result	Разница результатов, % Difference of results, %
Энергия удара, кДж Collision energy, kJ	473,07	473,07	0,00
Динамический прогиб, м Dynamic deflection, m	0,00	0,00	0,00
Индекс тяжести травмирования И Acceleration Severity Index (ASI)	1,10	1,05	4,55

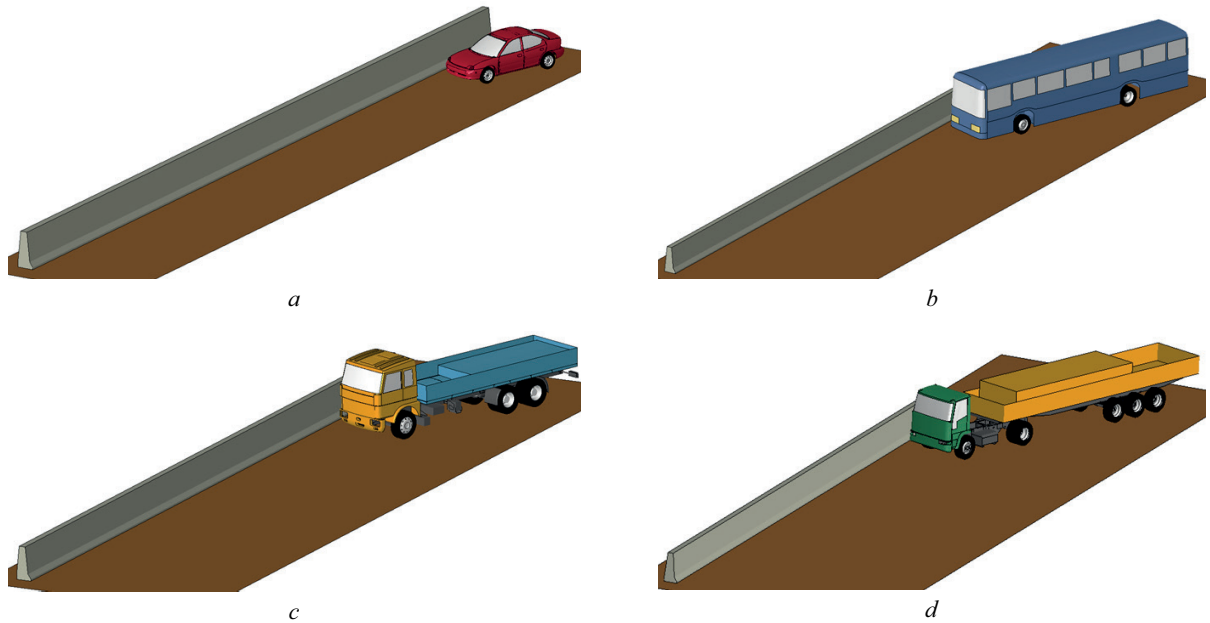


Рис. 7. Вид парапетного ограждения и ТС перед проведением виртуальных испытаний: *a* — легковой автомобиль; *b* — автобус; *c* — грузовой автомобиль; *d* — автопоезд

Fig. 7. Concrete road barrier and vehicle before virtual test: *a* — car; *b* — bus; *c* — truck; *d* — trailer truck

ты верификации подтвердили верность численного решения и низкую погрешность вычислений.

Валидации и верификация подготовленной виртуальной модели подтвердили ее физичность и корректность. Далее определялись величины нагрузки от удара ТС об ограждения. Для этого в исходную валидированную и верифицированную модель вносились изменения в соответствии с параметрами испытаний: варьировались тип ТС, скорость и масса ТС, а также прочие соответствующие параметры. Подготовленные модели перед проведением виртуальных испытаний по ГОСТ 33129–2024 показаны на рис. 7.

В инженерной практике нередко необходимо получить результат в достаточно сжатые сроки. Виртуальные испытания для установления горизонтальной (поперечной) нагрузки от удара ТС о парапетное ограждение обладают очевидными преимуществами, однако требуют компетенций в области КЭ-моделирования и анализа, предполагают наличие высокопроизводительного вычислительного оборудования, и, кроме того, полный цикл виртуальных испытаний занимает значительное время. В связи с чем в процессе выполнения настоящего исследования была использована математическая модель, позволяющая приближенно определять величину горизонтальной поперечной нагрузки от удара ТС об ограждение. Расчетная схема предложенной математической модели представлена на рис. 8.

Из геометрических соображений (рис. 8) величина поперечного смещения  $\Delta S$  центра масс ТС может быть определена как:

$$\Delta S = L \cdot \sin(\alpha) - 0,5 \cdot B \cdot [1 - \cos(\alpha)] + D. \quad (3)$$

Время  $\Delta t$ , за которое ц. м. ТС переместится на расстояние  $\Delta S$ :

$$\Delta t = \frac{\Delta S}{V_{\text{попер}}^{\text{cp}}}, \quad (4)$$

где  $\Delta t$  — промежуток времени от начала взаимодействия ТС с ограждением до момента времени, когда ТС параллельно лицевой рабочей поверхности недеформированного ограждения.

Значение средней поперечной скорости  $V_{\text{попер}}^{\text{cp}}$ :

$$V_{\text{попер}}^{\text{cp}} = \frac{1}{2} \cdot [V_{\text{н}} \cdot \sin(\alpha) + 0], \quad (5)$$

где  $V_{\text{н}}$  — скорость наезда ТС на ограждение.

Подставив выражения (3) и (5) в (4), получим:

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{L \cdot \sin(\alpha) - 0,5 \cdot B \cdot [1 - \cos(\alpha)] + D}{0,5 \cdot [V_{\text{н}} \cdot \sin(\alpha) + 0]} = \\ &= \frac{L \cdot \sin(\alpha) - 0,5 \cdot B \cdot [1 - \cos(\alpha)] + D}{0,5 \cdot V_{\text{н}} \cdot \sin(\alpha)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Значение поперечной составляющей ускорения  $a_{\text{попер}}$  может быть определено как отношение приращений скорости  $\Delta V_{\text{попер}}$  к приращению времени  $\Delta t$ :

$$\begin{aligned} a_{\text{попер}} &= \frac{\Delta V_{\text{попер}}}{\Delta t} = \frac{V_{\text{н}} \cdot \sin(\alpha) - 0}{\Delta t} = \\ &= \frac{V_{\text{н}} \cdot \sin(\alpha)}{\Delta t}. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая выражение (6):

$$a_{\text{попер}} = \frac{0,5 \cdot V_{\text{н}}^2 \cdot \sin^2(\alpha)}{L \cdot \sin(\alpha) - 0,5 \cdot B \cdot [1 - \cos(\alpha)] + D}. \quad (8)$$

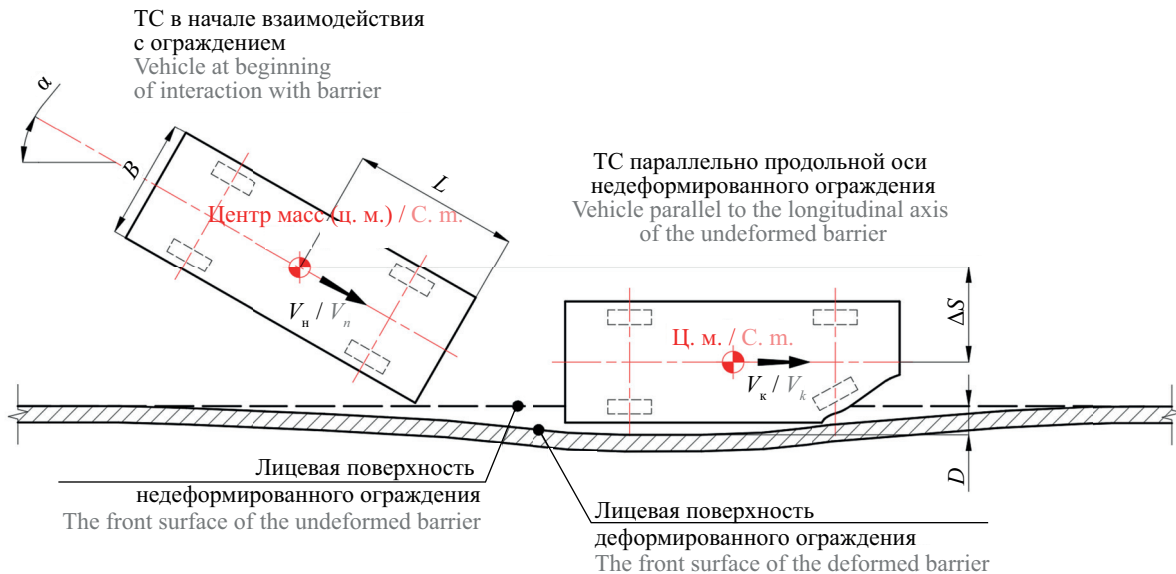


Рис. 8. Расчетная схема для математической модели

Fig. 8. Mathematical model calculation scheme

Далее значение поперечной составляющей  $F_{\text{попер}}$  силы удара ТС об ограждение может быть установлено на основании второго закона Ньютона:

$$F_{\text{попер}} = M \cdot a_{\text{попер}}, \quad (9)$$

где  $M$  — масса ТС;  $a_{\text{попер}}$  — поперечная составляющая ускорения.

При выводе вышеприведенных формул сделаны следующие допущения и предположения:

- величина замедления (ускорения) ТС принимается постоянной в течение интервала времени  $\Delta t$ ;
- вертикальные и вращательные ускорения ТС не учитываются;
- не учитывается жесткость конструкции ТС;
- в момент времени, когда ТС параллельно лицевой рабочей поверхности недеформированного ограждения, поперечная составляющая скорости транспортного средства принимается равной нулю;
- предполагается отсутствие возможности зацепления ТС за элементы ограждения в процессе его взаимодействия с ограждением;
- деформации ТС локализуются в зоне удара, а положение ц. м. ТС при этом существенно не изменяется;
- ц. м. ТС рассматривается как материальная точка, в которой сосредоточена вся масса;
- ограждение может рассматриваться как недеформированное ( $D = 0$ ), так и деформируемое ( $D > 0$ );
- силы трения, возникающие между шинами ТС и покрытием проезжей части, не учитываются;
- конструкция ограждения не содержит никаких выступающих элементов, способных вызвать резкое вертикальное перемещение ТС.

Важно отметить, что формула (9) дает оценку среднего значения усилия, тогда как на практике боль-

ший интерес представляет пиковое значение нагрузки, ее верхняя граница. Данным вопросом активно занимался Хирш (Т. J. Hirsch) [28, 29]. Рассмотрев процесс взаимодействия ТС и ограждения в виде линейно-упругой системы «масса – пружина», он аппроксимировал график изменения силы удара ТС об ограждение  $F_{\text{попер}} = F_{\text{попер}}(t)$  как синусоидальную волну. В случае данного допущения пиковое значение поперечной продольной силы удара ТС об ограждение  $F_{\text{попер}}^{\text{max1}}$  может быть определено следующим образом:

$$F_{\text{попер}}^{\text{max1}} = \frac{\pi}{2} F_{\text{попер}}. \quad (10)$$

Фаллер (R.K. Faller) [28, 30] предложил аппроксимировать зависимость силы удара ТС об ограждение  $F_{\text{попер}} = F_{\text{попер}}(t)$  как треугольный импульс. В таком случае пиковое значение  $F_{\text{попер}}^{\text{max2}}$  будет равно:

$$F_{\text{попер}}^{\text{max2}} = 2F_{\text{попер}}. \quad (11)$$

С практической точки зрения при проектировочных расчетах целесообразно применять формулу, предложенную Фаллером (11), поскольку она аппроксимирует график силы времени треугольным импульсом и тем самым дает более консервативную оценку пикового усилия, чем полусинусоидальная модель Хирша.

При одинаковых значениях импульса  $I$  и длительности взаимодействия  $\Delta t$  отношение пиковых значений составляет  $4/\pi \approx 1,27$ , т.е. треугольная аппроксимация систематически выше примерно на 27%. Такая консервативность прямо транслируется в больший запас по прочности для элементов ограждения и его анкеровки, а также для сопряжений с плитой пролетного строения.

Кроме того, формула Фаллера страшает инженерный расчет от неизбежных неопределенностей

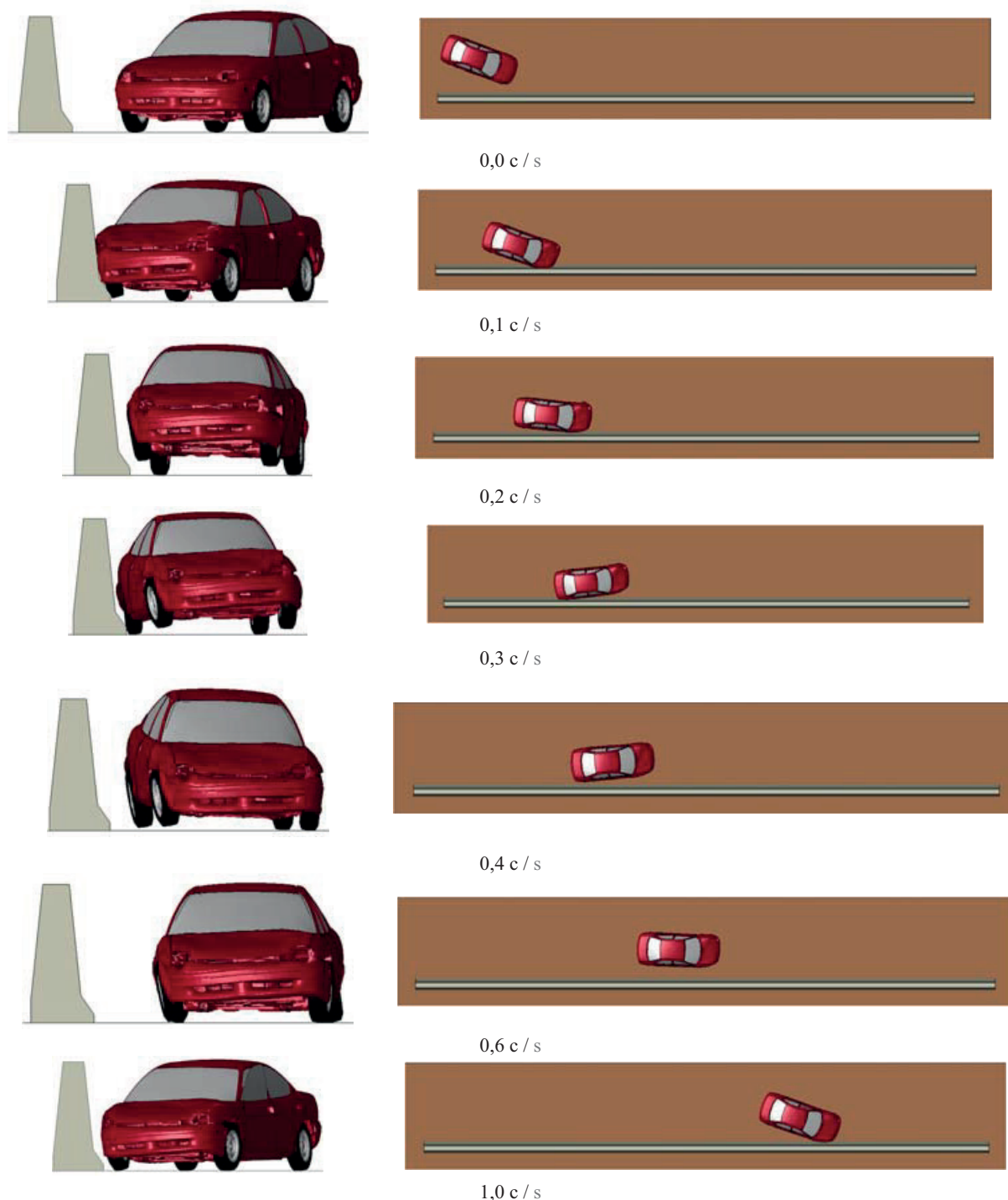
постановки: разброса коэффициента трения «шина – покрытие», разброса жесткости и демпфирования в узлах крепления, вариаций длительности контакта. В условиях ограниченного времени и неполной исходной информации использование более строгой верхней оценки силы снижает риск недоучета возможных воздействий. В связи с чем для предварительных проектировочных расчетов предпочтительной является именно треугольная схема по Фаллеру, тогда как полусинусоидальная аппроксимация Хирша уместна как нижняя оценка границы силы удара.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кадры кинограмм некоторых виртуальных испытаний, выполненных в рамках настоящего исследования, приведены на рис. 9.

По результатам обработки данных виртуальных испытаний получены графики изменения контактной силы между ТС и ограждением во времени  $F_{\text{попер}} = F_{\text{попер}}(t)$ , которые представлены на рис. 10.

По графикам на рис. 10 определены максимальные (пиковые значения) силы удара ТС об ограждение. Результаты приведены в табл. 5.





1,3 с / s  
a



0,0 с / s



0,2 с / s



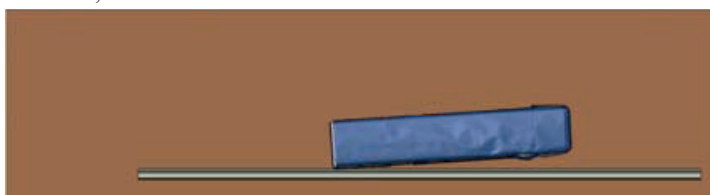
0,4 с / s



0,6 с / s



0,8 с / s



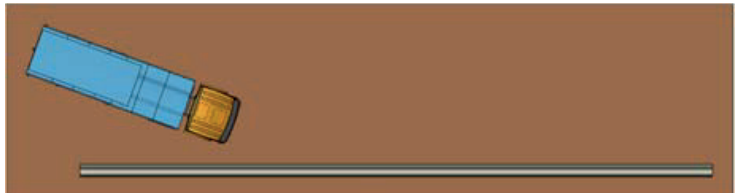
1,0 с / s



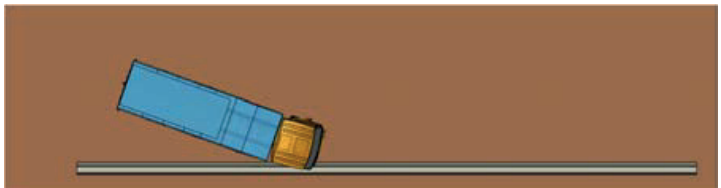
1,2 с / s



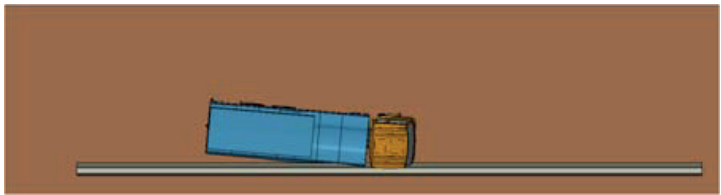
1,5 c / s  
*b*



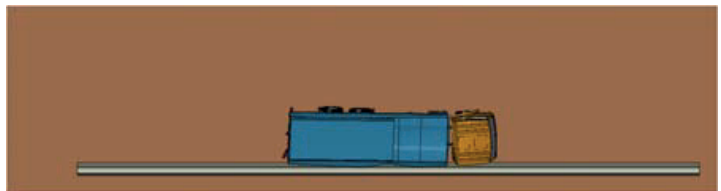
0,0 c / s



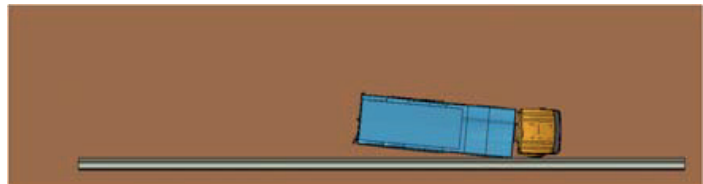
0,25 c / s



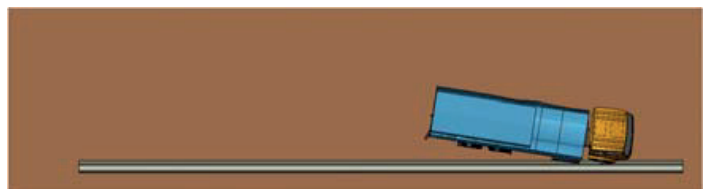
0,50 c / s



0,75 c / s



1,00 c / s



1,25 c / s

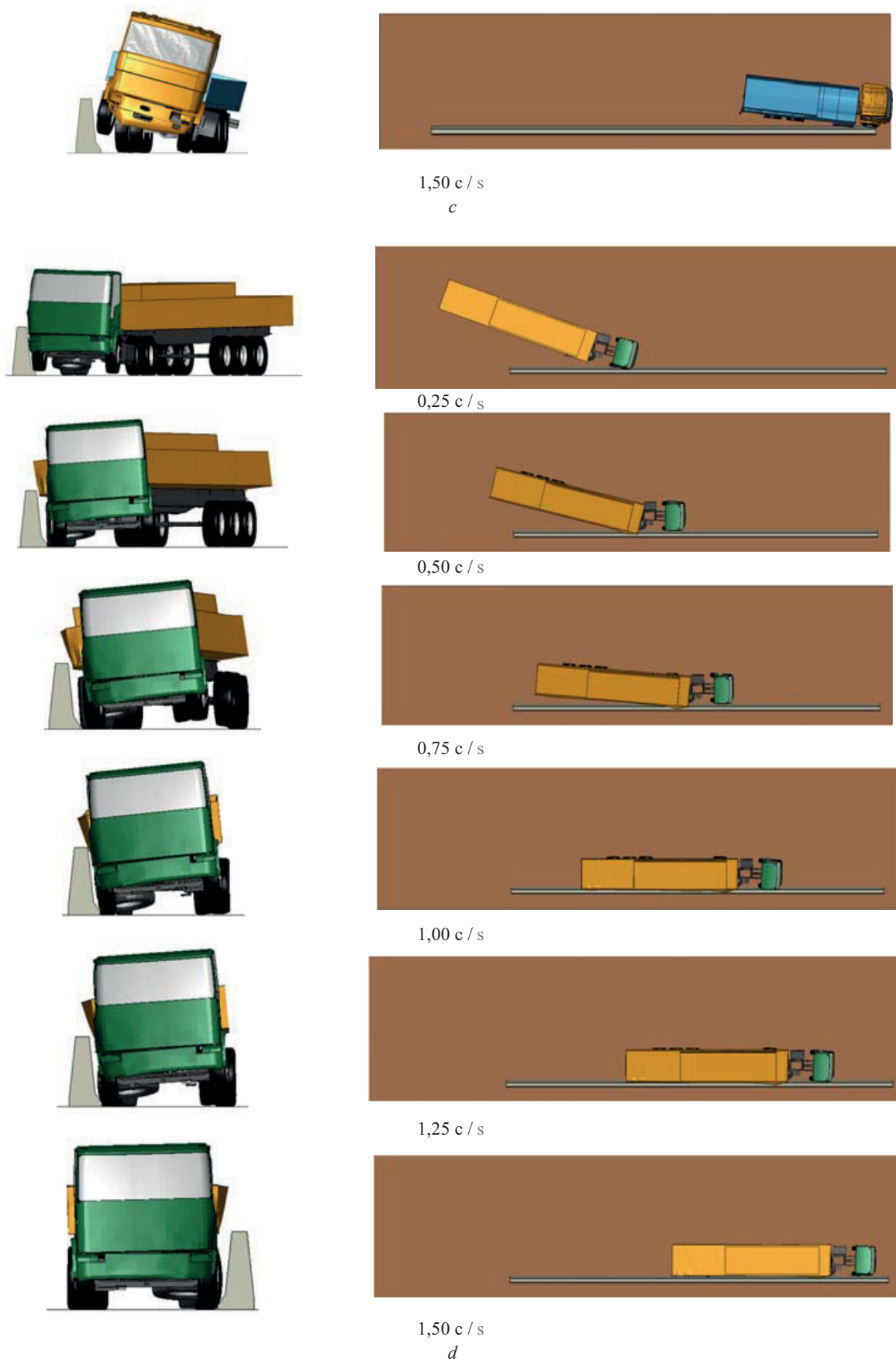
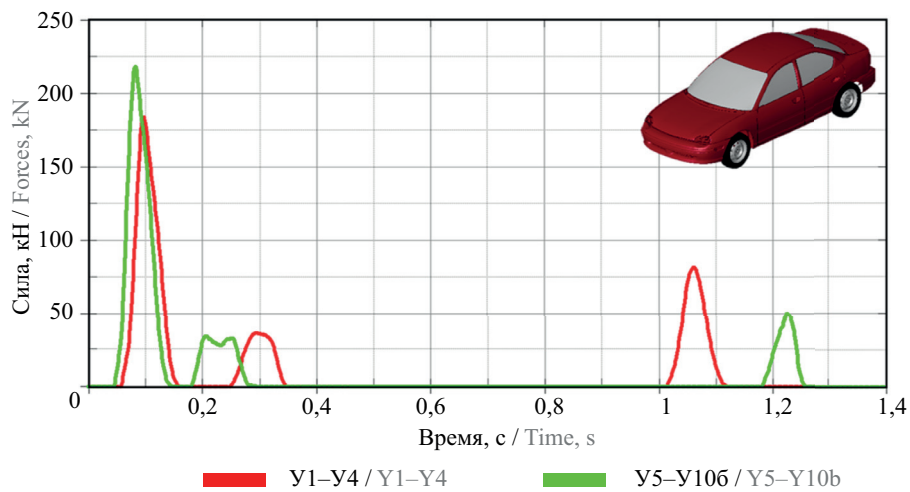
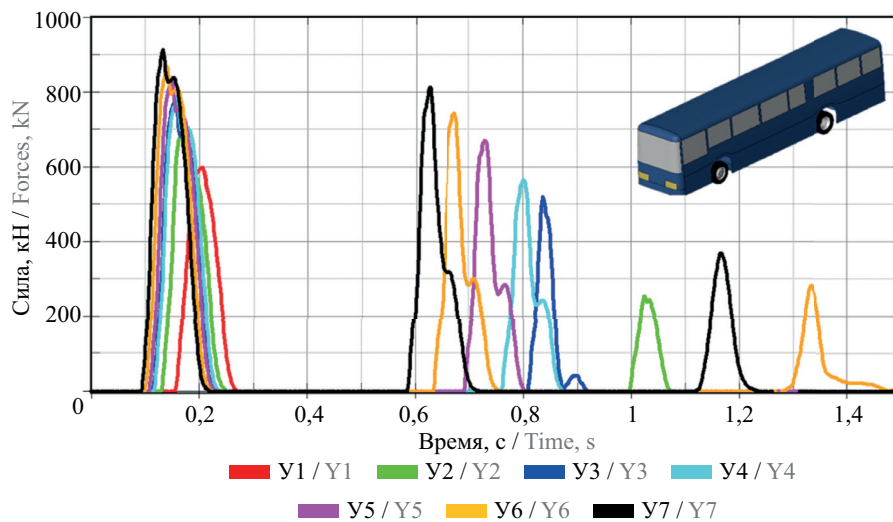


Рис. 9. Отдельные кадры кинограмм виртуальных испытаний: *a* — легковой автомобиль; *b* — автобус; *c* — грузовой автомобиль; *d* — автопоезд

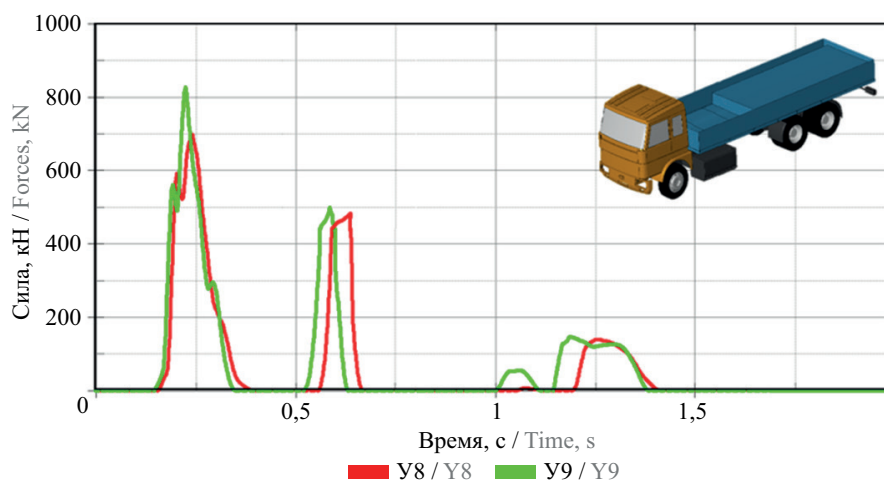
Fig. 9. Virtual test individual footage: *a* — car; *b* — bus; *c* — truck; *d* — trailer truck



a



b



c

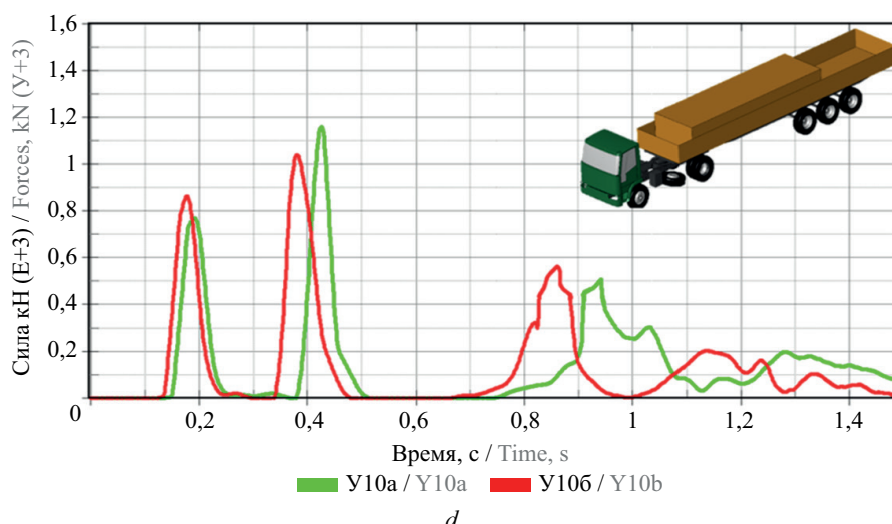




























Рис. 10. Графики изменения силы удара ТС об ограждение во времени: *a* — легковой автомобиль; *b* — автобус; *c* — грузовой автомобиль; *d* — автопоезд

Fig. 10. Impact force versus time curve for the vehicle–barrier collision: *a* — car; *b* — bus; *c* — truck; *d* — trailer truck

Табл. 5. Максимальное (пиковое значение) силы удара ТС об ограждение по данным виртуальных испытаний, кН

Table 5. Maximum (peak value) impact force of vehicle-barrier collision based on virtual test data, kN

Уровень удерживающей способности Containment level	Легковой автомобиль Car 	Грузовой автомобиль Truck 	Автобус Bus 	Автопоезд Trailer truck 
Y1 / Y1	185 	–	600 	–
Y2 / Y2	185 	–	700 	–
Y3 / Y3	185 	–	770 	–
Y4 / Y4	185 	–	780 	–
Y5 / Y5	220 	–	830 	–
Y6 / Y6	220 	–	865 	–
Y7 / Y7	220 	–	910 	–
Y8 / Y8	220 	695 	–	–
Y9 / Y9	220 	800 	–	–
Y10a / Y10a	220 	–	–	1030 
Y10b / Y10b	220 	–	–	1150 

Примечание: цвет справа от значения силы показывает цвет кривой на графиках на рис. 10 для легкового автомобиля, грузового автомобиля, автобуса и автопоезда соответственно.

Note: the colour to the right of the force value shows the curve colour in the graphs in Fig. 10 for a car, a truck, a bus and a trailer truck, respectively.

Горизонтальная поперечная нагрузка от удара ТС о парапетное ограждение также была определена по предложенной математической модели. По формулам (10)–(12) для каждого уровня удерживающей способности вычислены: среднее значение горизонтальной поперечной силы удара  $F_{\text{попер}}$ , максимальное (пиковое) значение по методике Хирша  $F_{\text{попер}}^{\text{max1}}$  и максимальное (пиковое) значение  $F_{\text{попер}}^{\text{max2}}$  по методике Фаллера. Параметры ТС и режим испытаний (масса, скорость, угол наезда) в расчетах по математической

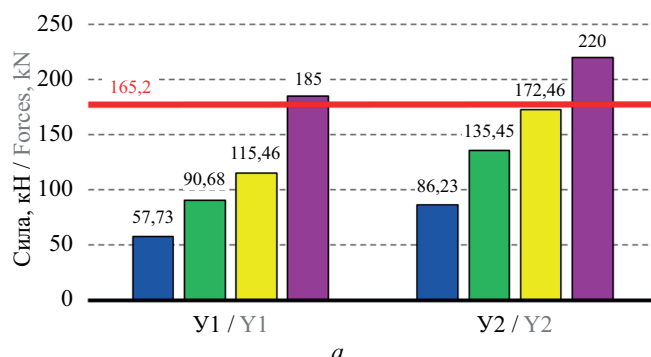
модели приняты идентичными виртуальным испытаниям, результаты которых приведены выше. Итоговые значения усилий, установленные по математической модели, сведены в табл. 6.

Итоговые значения горизонтальной поперечной нагрузки от удара ТС о парапетное бетонное ограждение, установленные различными методами, представлены на рис. 11 в виде гистограмм. Для каждого уровня удерживающей способности с учетом типа ТС показаны 4 оценки, определенные ранее в рамках

Табл. 6. Значение силы удара ТС об ограждение, определенное по математической модели, кН

Table 6. Impact force value, determined by mathematical model, kN

Уровень удерживающей способности Containment level	Легковой автомобиль Car			Грузовой автомобиль Truck			Автобус Bus			Автопоезд Trailer truck		
	$F_{\text{попер}}$ $F_{\text{trans}}$	$F_{\text{попер}}^{\text{max1}}$ $F_{\text{trans}}^{\text{max1}}$	$F_{\text{попер}}^{\text{max2}}$ $F_{\text{trans}}^{\text{max2}}$	$F_{\text{попер}}$ $F_{\text{trans}}$	$F_{\text{попер}}^{\text{max1}}$ $F_{\text{trans}}^{\text{max1}}$	$F_{\text{попер}}^{\text{max2}}$ $F_{\text{trans}}^{\text{max2}}$	$F_{\text{попер}}$ $F_{\text{trans}}$	$F_{\text{попер}}^{\text{max1}}$ $F_{\text{trans}}^{\text{max1}}$	$F_{\text{попер}}^{\text{max2}}$ $F_{\text{trans}}^{\text{max2}}$	$F_{\text{попер}}$ $F_{\text{trans}}$	$F_{\text{попер}}^{\text{max1}}$ $F_{\text{trans}}^{\text{max1}}$	$F_{\text{попер}}^{\text{max2}}$ $F_{\text{trans}}^{\text{max2}}$
У1 / У1	57,73	90,68	115,46	–	–	–	64,5	101,32	129,00	–	–	–
У2 / У2	57,73	90,68	115,46	–	–	–	92,93	145,97	185,86	–	–	–
У3 / У3	57,73	90,68	115,46	–	–	–	119,36	187,49	238,72	–	–	–
У4 / У4	57,73	90,68	115,46	–	–	–	133,13	209,12	266,26	–	–	–
У5 / У5	86,23	135,45	172,46	–	–	–	153,74	241,49	307,48	–	–	–
У6 / У6	86,23	135,45	172,46	–	–	–	175,83	276,19	351,66	–	–	–
У7 / У7	86,23	135,45	172,46	–	–	–	199,42	313,25	398,84	–	–	–
У8 / У8	86,23	135,45	172,46	273,44	429,52	546,88	–	–	–	–	–	–
У9 / У9	86,23	135,45	172,46	305,12	479,28	610,24	–	–	–	–	–	–
У10а / У10а	86,23	135,45	172,46	–	–	–	–	–	–	245,29	385,30	490,58
У10б / У10б	86,23	135,45	172,46	–	–	–	–	–	–	295,06	463,48	590,12



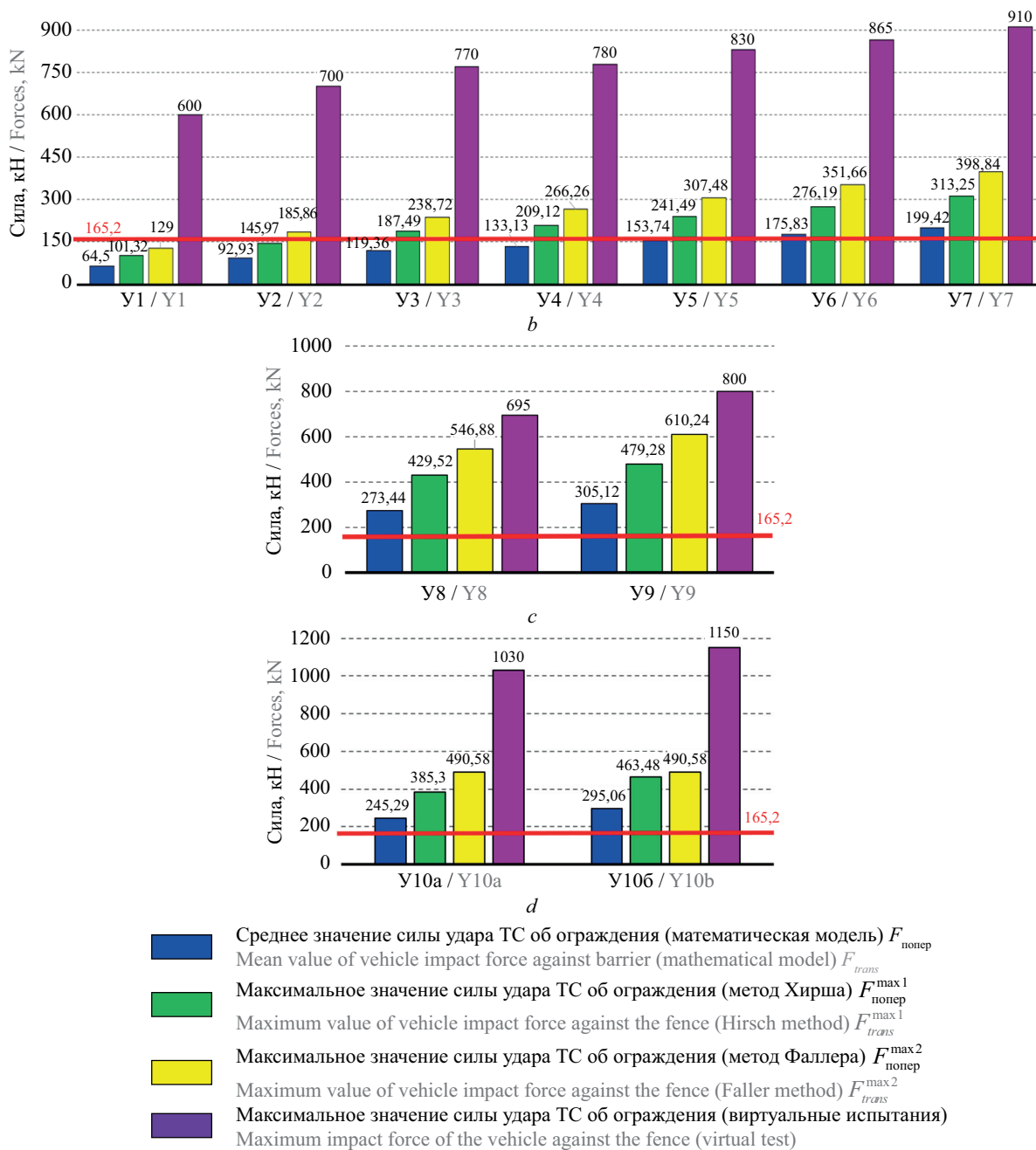


Рис. 11. Значения нагрузки от удара ТС о парапетное ограждение, определенное по различным методикам: *a* — легковой автомобиль; *b* — автобус; *c* — грузовой автомобиль; *d* — автопоезд

Fig. 11. Vehicle collision forces on concrete road barrier, determined by different techniques: *a* — a car; *b* — a bus; *c* — a truck; *d* — a trailer truck

настоящего исследования (табл. 5, 6). Такой формат визуализации позволяет сопоставить результаты аналитических оценок и виртуальных расчетов, а также проследить влияние типа ТС и уровня удерживающей способности на величину пиковых и средних нагрузок.

Также на гистограммах нанесена горизонтальная красная линия, соответствующая значению горизонтальной поперечной нагрузки от удара ТС о парапетное ограждение по п. 6.19 СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» (165,2 кН). Напомним, что в действующей нормативно-технической базе РФ эта

нагрузка не увязана с уровнем удерживающей способности ограждения, определяемым ГОСТ 33128 и ГОСТ 33129: при расчете искусственных сооружений независимо от уровня удерживающей способности горизонтальная поперечная нагрузка от удара ТС на парапетное бетонное ограждение принимается равной 165,2 кН.

Полученные в настоящем исследовании результаты показывают, что для большинства уровней удерживающей способности расчетные значения горизонтальной нагрузки существенно превышают указанную в СП 35.13330.2011 величину (до 7 раз). С учетом

того, что на искусственных сооружениях ограждения с уровнем ниже УЗ практически не применяются, нагрузка по СП 35.13330.2011 оказывается ниже полученной в рамках данного исследования нагрузки практически во всех рассматриваемых случаях.

Значения горизонтальной (поперечной) нагрузки, полученные по результатам виртуальных испытаний, выше, чем оценки по предложенной математической модели. Это обусловлено:

- множеством допущений и упрощений, заложенных в предложенной в рамках настоящего исследования математической модели;
- сознательно оценочным, упрощенным характером математической модели;
- учетом в виртуальных испытаниях факторов, игнорируемых в математической модели параметров: вертикальных и вращательных ускорений ТС, жесткости контактируемых тел, силы трения и т.д.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрена горизонтальная поперечная нагрузка от удара ТС о парапетное бетонное ограждение — воздействие, которое инженеры-проектировщики обязаны учитывать при расчете искусственных сооружений (мостов, путепроводов и т.д.). Действующая в РФ величина нагрузки определяется в практике проектирования по требованиям СНИП 2.05.03–84 (в актуализированном виде — СП 35.13330.2011) и с момента введения не претерпела пересмотра, несмотря на существенный рост интенсивности движения, скоростей и изменений состава транспортного потока.

Сравнительный анализ нормативно-технической базы показал, что по нормам РФ (п. 6.19 СП 35.13330.2011) расчетная нагрузка заметно ниже (ориентировочно в 3–5 раз), чем в зарубежных документах: AASHTO LRFD, разд. A13.2 (США) и EN 1991-2, п. 4.7.3.3 (ЕС). Кроме того, в российской практике величина поперечной нагрузки не увязана с уровнем удерживающей способности ограждения по ГОСТ 33128 и ГОСТ 33129 и фактически принимается постоянной (165,2 кН) для любых уровней, что приводит к систематическому расхождению с реальными сценариями удара.

Основные ключевые выводы исследования:

- реальные значения горизонтальной поперечной нагрузки при ударе ТС о парапетное ограждение существенно превышают нормативные расчетные показатели, принятые в РФ;
- нагрузка значительно зависит от уровня удерживающей способности ограждения (массы, скорости и угла наезда, соответствующих уровню удерживающей способности по ГОСТ 33128/33129). Принятие единой постоянной величины для всех уровней приводит к значительной погрешности и повышенным эксплуатационным рискам.

Следует подчеркнуть, что величина нагрузки зависит от множества факторов: коэффициента трения «шина – покрытие», жесткости и схемы анкеровки ограждения, типа и параметров ТС, планово-высотного положения (кривые, продольные уклоны), характеристик плиты и сопряжений и др. Варьирование отдельных параметров (например, коэффициента трения или жесткости связи ограждения с основанием) способно изменить рассчитанную нагрузку до двух раз.

Итог — действующие требования к учету горизонтальной поперечной нагрузки подлежат актуализации, поскольку не отражают современных условий движения и уровней удерживающей способности. Результаты настоящей работы достаточно, чтобы обосновать необходимость пересмотра подхода и диапазон целевых значений, однако недостаточно для немедленного установления единого статически эквивалентного воздействия для расчетов мостовых конструкций.

Дальнейшие направления исследований:

- расширенная серия виртуальных испытаний с исследованием влияния различных параметров (трения, анкеровки, геометрии рабочей поверхности, свойства материалов);
- выработка регламентированной процедуры перехода от динамических результатов к статически эквивалентной схеме (учет импульса, длительности контакта, эффективной длины распределения и высоты приложения результирующей);
- подготовка предложений по изменению п. 6.19 СП 35.13330.2011 с привязкой нагрузок к уровням удерживающей способности по ГОСТ 33128/33129 и параметрам сценария наезда.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Сторожев С.А., Логинов В.Ю., Аристархова А.Н.* Влияние сертификации дорожных ограждений на безопасность дорожного движения // Безопасность дорожного движения. 2022. № 2. С. 52–56. EDN OWTNRQ.
2. *Андреев К.П., Борычев С.Н., Терентьев В.В., Шемякин А.В.* Дорожные ограждения: современные решения для повышения безопасности движения // Грузовик. 2021. № 6. С. 43–48. EDN JXOXJJ.

3. *Андреев К.П., Терентьев В.В., Шемякин А.В.* Применение дорожного энергопоглощающего ограждения для повышения безопасности движения // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2018. № 1. С. 5–12. DOI: 10.15593/24111678/2018.01.01. EDN YVQGQA.
4. *Qiao W., Huang E., Guo H., Liu Y., Ma X.* Barriers involved in the safety management systems: a systematic review of literature // International Journal of En-

vironmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19. Issue 15. P. 9512. DOI: 10.3390/ijerph19159512

5. *Сунгатуллина К.А.* Условия и факторы, влияющие на безопасность дорожного движения на современном этапе // Вестник НЦБЖД. 2022. № 2 (52). С. 126–135. EDN UKXUKI.

6. *Дергунов С.А., Орехов С.А., Тарановская Е.А., Самигуллин Н.Р.* Дорожные ограждения, рассеивающие энергию удара // Тенденции развития науки и образования. 2017. № 26–4. С. 69–71. DOI: 10.18411/lj-31-05-2017-72. EDN ZCNFPT.

7. *Тавшавадзе Б.Т.* Разработка и обоснование методологии расчетов, испытаний и сертификации дорожных удерживающих ограждений барьерного типа : дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 147 с. EDN CNLKWQ.

8. *Zain M.F.B.M., Mohammed H.J.* Concrete road barriers subjected to impact loads: An overview // Latin American Journal of Solids and Structures. 2015. Vol. 12. Issue 10. Pp. 1824–1858. DOI: 10.1590/1679-78251783

9. *Овчинников И.И., Валиев Ш.Н., Овчинников И.Г., Шатилов И.С.* Аварии транспортных сооружений и их предупреждение : учебное пособие. Чебоксары, 2020. 216 с. DOI: 10.31483/a-186. EDN ZJXBLO.

10. *Faller R.K., Rohde J.R., Rosson B.T., Smith R.P., Addink K.H.* Development of a TL-3 F-shape Temporary Concrete Median Barrier. MwRSF Research Report No. TRP-03-064-96. Lincoln, NE : Midwest Roadside Safety Facility, University of Nebraska–Lincoln, 1996. URL: <https://mwrsf.unl.edu/reportResult.php?reportId=158>

11. *Bhakta S.K., Lechtenberg K.A., Faller R.K., Reid J.D., Bielenberg R.W., Urbank E.L.* Performance Evaluation of New Jersey’s Portable Concrete Barrier with a Bolted Configuration and Grouted Toes — Test No. NJPCB-2. MwRSF Research Report No. TRP-03-340-18. Lincoln, NE : Midwest Roadside Safety Facility, University of Nebraska–Lincoln, 2018. URL: <https://mwrsf.unl.edu/reportResult.php?reportId=349>

12. *Bielenberg B., Lingenfelter J., Stolle C., Ruskamp R., Pajouh M.* Development of a New, MASH 2016 TL-3 Portable Barrier System — Phase I. MwRSF Research Report No. TRP-03-460-22. Lincoln, NE : Midwest Roadside Safety Facility, University of Nebraska–Lincoln, 2022. URL: <https://mwrsf.unl.edu/reportResult.php?reportId=451>

13. *Bhakta S.K., Lechtenberg K.A., Faller R.K., Reid J.D., Bielenberg R.W., Urbank E.L.* Performance Evaluation of New Jersey’s Portable Concrete Barrier with a Free-Standing Configuration — Test No. NJPCB-3. MwRSF Research Report No. TRP-03-355-18. Lincoln, NE : Midwest Roadside Safety Facility, University of Nebraska–Lincoln, 2018. URL: <https://mwrsf.unl.edu/reportResult.php?reportId=350>

14. *Bligh R.P., Abu-Odeh A.Y., Hamilton M.E., Seckinger N.R.* Evaluation of Roadside Safety Devices Using Finite Element Analysis. Research Re-

port No. FHWA/TX-04/0-1816-1. College Station, TX : Texas Transportation Institute, Texas A&M University, 2004. 66 p.

15. *Sheikh N.M., Kovar J.C., Cakalli S., Menges W.L., Schroeder G.E., Kuhn D.L.* Analysis of 54-Inch Tall Single-Slope Concrete Barrier on a Structurally Independent Foundation. Research Report No. FHWA/TX-19/0-6948-R1. College Station, TX : Texas A&M Transportation Institute, 2019.

16. *Sheikh N.M., Bligh R.P., Kovar J.C., Cakalli S., Menges W.L., Schroeder G.E., Kuhn D.L.* Development of Structurally Independent Foundations for 36-Inch Tall Single Slope Traffic Rail (SSTR) for MASH TL-4. Research Report No. FHWA/TX-19/0-6968-R7. College Station, TX : Texas A&M Transportation Institute, 2020.

17. *Silvestri-Dobrovoly C., Schroeder W.J.L., Kuhn D.L.* Develop Guidelines for Inspection, Repair, and Use of Portable Concrete Barriers — Volume 2: Crash Report. Research Report No. FHWA/TX-22/0-7059-R1-Vol2. College Station, TX : Texas A&M Transportation Institute, 2022. 96 p.

18. *Sheikh N.M., Bligh R.P., Holt J.M.* Minimum Rail Height and Design Impact Load for Longitudinal Barriers That Meet Test Level 4 of Manual for Assessing Safety Hardware // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2012. Vol. 2309. Issue 1. Pp. 135–143. DOI: 10.3141/2309-14

19. *Sheikh N.M., Bligh R.P., Menges W.L.* Development and Testing of a Concrete Barrier Design for Use in Front of Slope or on MSE Wall. Research Report No. 405160-13-1. College Station, TX : Texas Transportation Institute, 2009. 79 p.

20. *Tabacu S., Pandrea N.* Numerical (analytical-based) model for the study of vehicle frontal collision // International Journal of Crashworthiness. 2008. Vol. 13. Issue 4. Pp. 387–410. DOI: 10.1080/13588260802030588

21. *Abu-Odeh A.Y., Kim K.-M., Williams W.F., Patton C.* Crash Wall Design for Mechanically Stabilized Earth (MSE) Retaining Wall. Phase I: Engineering Analysis and Simulation. Research Report No. 405160-15. Olympia, WA : Washington State Department of Transportation, 2011. 117 p.

22. *Rosenbaugh S.K., Faller R.K., Dixon J., Loken A., Rasmussen J.D., Flores J.* Development and Testing of an Optimized MASH TL-4 Concrete Bridge Rail. MwRSF Research Report No. TRP-03-415-21. Lincoln, NE : Midwest Roadside Safety Facility, University of Nebraska–Lincoln, 2021.

23. *Астров В.А.* Обоснование практических методов повышения пассивной безопасности дорожных ограждений : дис. ... д-ра техн. наук. Балашиха, 1990. 340 с.

24. *Демьянушко И.В.* Виртуальный цифровой испытательный полигон для проведения испытаний элементов дорожного обустройства при наездах транспортных средств // XXXII Междунар. иннова-

ционная конф. молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения : сб. тр. конф. 2021. С. 4–16. EDN RUYFYG.

25. Демьянушко И.В. Применение виртуально-динамического анализа для исследования краш-ситуаций взаимодействия автомобиля с дорожными конструкциями // Механика и математическое моделирование в технике : II Всеросс. науч.-техн. конф., посвящ. юбилеям основателей кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана профессором С.Д. Пономарева, В.Л. Бидермана, К.К. Лихарева, Н.Н. Малинина, В.А. Светлицкого : сб. тр. 2017. С. 116–120. EDN ZRYUQD.

26. Демьянушко И.В., Титов О.В., Михеев П.С., Карпов И.А. Цифровое моделирование разрушения в элементах дорожных ограждений при ударном наезде автомобиля // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 12. С. 1896–1919. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1896-1919. EDN AHVXLQ.

27. Титов О.В. Разработка экспериментально-расчетного комплекса валидации физико-математических моделей дорожных ограждений для цифрового моделирования ударного наезда автомобиля : дис. ... канд. техн. наук. М., 2024. 163 с.

28. Loken A.E. Establishing Safe Operating Speeds for Autonomous Vehicles: A Case Study from the Automated Skyway Express in Jacksonville, Florida : thesis. Lincoln, NE : University of Nebraska-Lincoln, 2021.

29. Hirsch T.J. Analytical Evaluation of Texas Bridge Rails to Contain Buses and Trucks. Research Report No. 230-2. College Station, TX : Texas Transportation Institute, Texas A&M University, 1978.

30. Faller R.K., Soyland K., Rosson B.T., Stutzman T.M. TL-1 Curb-Type Bridge Railing for Longitudinal Glulam Timber Decks Located on Low-Volume Roads. MwRSF Research Report No. TRP-03-54-96. Lincoln, NE : Midwest Roadside Safety Facility, University of Nebraska-Lincoln, 1996.

Поступила в редакцию 22 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 27 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ : **Ирина Вадимовна Демьянушко** — доктор технических наук, профессор кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 158270, Scopus: 6602540287, ResearcherID: G-5604-2013, ORCID: 0000-0001-6726-1131; demj-ir@mail.ru;

**Илья Анатольевич Карпов** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 971215, Scopus: 57209366542, ResearcherID: AAL-8344-2021, ORCID: 0000-0003-2574-2839; ilya.karpov@outlook.com;

**Алексей Геннадьевич Локить** — аспирант, ассистент кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 1207674; Scopus: 57216159090; ResearcherID: IWV-2173-2023; ORCID: 0009-0009-8087-4966; algenlok@mail.ru.

Вклад авторов:

Демьянушко И.В. — научное руководство, разработка концепции и идеи исследования, редактирование итогового текста.

Карпов И.А. — разработка виртуальных моделей ТС, помощь в проведении виртуальных испытаний и калибровки моделей, редактирование текста.

Локить А.Г. — создание виртуальных моделей ограждения, проведение виртуальных испытаний, валидация и верификация виртуальных моделей, калибровка моделей, обработка результатов, участие в подготовке и проведении натурных испытаний, написание текста статьи и подготовка графического материала для статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Storozhev S.A., Loginov V.Yu., Aristarkhova A.N. The impact of road barriers certification on road safety. *Road Safety*. 2022; 2:52-56. EDN OWTNRQ. (rus.).
2. Andreev K.P., Borychev S.N., Terentyev V.V., Shemyakin A.V. Road barriers: modern solutions for improving traffic safety. *Truck*. 2021; 6:43-48. EDN JXOXJJ. (rus.).
3. Andreev K.P., Terentyev V.V., Shemyakin A.V. The use of energy-absorbing traffic guardrail to improve traffic safety. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2018; 1:5-12. DOI: 10.15593/24111678/2018.01.01. EDN YVGQRA. (rus.).
4. Qiao W., Huang E., Guo H., Liu Y., Ma X. Barriers involved in the safety management systems: a sys-

tematic review of literature. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022; 19(15):9512. DOI: 10.3390/ijerph19159512

5. Sungatullina K.A. Conditions and factors affecting road safety at the present stage. *Vestnik NTsBZhD*. 2022; (52):126-135. EDN UKXUKI. (rus.).

6. Dergunov S.A., Orekhov S.A., Taranovskaya E.A., Samigullin N.R. Road barriers that dissipate impact energy. *Trends in the Development of Science and Education*. 2017; 26-4:69-71. DOI: 10.18411/lj-31-05-2017-72. EDN ZCNFPT. (rus.).

7. Tavshavadze B.T. *Development and justification of a methodology for calculations, testing and certification of barrier-type road restraint barriers : dis. ... candidate of technical sciences*. Moscow, 2019; 147. EDN CNLKWQ. (rus.).

8. Zain M.F.B.M., Mohammed H.J. Concrete road barriers subjected to impact loads: An overview. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2015; 12(10):1824-1858. DOI: 10.1590/1679-78251783

9. Ovchinnikov I.I., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.G., Shatilov I.S. *Accidents of transport structures and their prevention : tutorial*. Cheboksary, 2020; 216. DOI: 10.31483/a-186. EDN ZJXBLO. (rus.).

10. Faller R.K., Rohde J.R., Rosson B.T., Smith R.P., Addink K.H. *Development of a TL-3 F-shape Temporary Concrete Median Barrier*. MwRSF Research Report No. TRP-03-064-96. Lincoln, NE, Midwest Roadside Safety Facility, University of Nebraska-Lincoln, 1996. URL: <https://mwrsf.unl.edu/reportResult.php?reportId=158>

11. Bhakta S.K., Lechtenberg K.A., Faller R.K., Reid J.D., Bielenberg R.W., Urbank E.L. *Performance Evaluation of New Jersey's Portable Concrete Barrier with a Bolted Configuration and Grouted Toes — Test No. NJPCB-2*. MwRSF Research Report No. TRP-03-340-18. Lincoln, NE, Midwest Roadside Safety Facility, University of Nebraska-Lincoln, 2018. URL: <https://mwrsf.unl.edu/reportResult.php?reportId=349>

12. Bielenberg B., Lingenfelter J., Stolle C., Ruskamp R., Pajouh M. *Development of a New, MASH 2016 TL-3 Portable Barrier System — Phase I*. MwRSF Research Report No. TRP-03-460-22. Lincoln, NE, Midwest Roadside Safety Facility, University of Nebraska-Lincoln, 2022. URL: <https://mwrsf.unl.edu/reportResult.php?reportId=451>

13. Bhakta S.K., Lechtenberg K.A., Faller R.K., Reid J.D., Bielenberg R.W., Urbank E.L. *Performance Evaluation of New Jersey's Portable Concrete Barrier with a Free-Standing Configuration — Test No. NJPCB-3*. MwRSF Research Report No. TRP-03-355-18. Lincoln, NE, Midwest Roadside Safety Facility, University of Nebraska-Lincoln, 2018. URL: <https://mwrsf.unl.edu/reportResult.php?reportId=350>

14. Bligh R.P., Abu-Odeh A.Y., Hamilton M.E., Seckinger N.R. *Evaluation of Roadside Safety Devices Using Finite Element Analysis*. Research Re-

port No. FHWA/TX-04/0-1816-1. College Station, TX, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, 2004; 66.

15. Sheikh N.M., Kovar J.C., Cakalli S., Menges W.L., Schroeder G.E., Kuhn D.L. *Analysis of 54-Inch Tall Single-Slope Concrete Barrier on a Structurally Independent Foundation*. Research Report No. FHWA/TX-19/0-6948-R1. College Station, TX, Texas A&M Transportation Institute, 2019.

16. Sheikh N.M., Bligh R.P., Kovar J.C., Cakalli S., Menges W.L., Schroeder G.E., Kuhn D.L. *Development of Structurally Independent Foundations for 36-Inch Tall Single Slope Traffic Rail (SSTR) for MASH TL-4*. Research Report No. FHWA/TX-19/0-6968-R7. College Station, TX, Texas A&M Transportation Institute, 2020.

17. Silvestri-Dobrovoly C., Schroeder W.J.L., Kuhn D.L. *Develop Guidelines for Inspection, Repair, and Use of Portable Concrete Barriers — Volume 2: Crash Report*. Research Report No. FHWA/TX-22/0-7059-R1-Vol2. College Station, TX, Texas A&M Transportation Institute, 2022; 96.

18. Sheikh N.M., Bligh R.P., Holt J.M. Minimum Rail Height and Design Impact Load for Longitudinal Barriers That Meet Test Level 4 of Manual for Assessing Safety Hardware. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2012; 2309(1):135-143. DOI: 10.3141/2309-14

19. Sheikh N.M., Bligh R.P., Menges W.L. *Development and Testing of a Concrete Barrier Design for Use in Front of Slope or on MSE Wall*. Research Report No. 405160-13-1. College Station, TX, Texas Transportation Institute, 2009; 79.

20. Tabacu S., Pandrea N. Numerical (analytical-based) model for the study of vehicle frontal collision. *International Journal of Crashworthiness*. 2008; 13(4):387-410. DOI: 10.1080/13588260802030588

21. Abu-Odeh A.Y., Kim K.-M., Williams W.F., Patton C. *Crash Wall Design for Mechanically Stabilized Earth (MSE) Retaining Wall. Phase I: Engineering Analysis and Simulation*. Research Report No. 405160-15. Olympia, WA, Washington State Department of Transportation, 2011; 117.

22. Rosenbaugh S.K., Faller R.K., Dixon J., Loken A., Rasmussen J.D., Flores J. *Development and Testing of an Optimized MASH TL-4 Concrete Bridge Rail*. MwRSF Research Report No. TRP-03-415-21. Lincoln, NE, Midwest Roadside Safety Facility, University of Nebraska-Lincoln, 2021.

23. Astrov V.A. *Justification of practical methods for improving passive safety of road barriers : dis. ... doctor of technical sciences*. Balashikha, 1990; 340. (rus.).

24. Demyanushko I.V. Virtual digital test site for testing road structure elements during vehicle collisions. *XXXII International Innovative Conference of Young Scientists and Students on Mechanical Engineering : conference proceedings*. 2021; 4-16. EDN RUYFYG. (rus.).

25. Demyanushko I.V. Application of virtual dynamic analysis for studying crash situations of vehicle interaction with road structures. *Mechanics and Mathematical Modeling in Engineering: II All-Russian Scientific and Technical Conference dedicated to the anniversaries of the founders of the Applied Mechanics Department of Bauman Moscow State Technical University, professors S.D. Ponomarev, V.L. Biderman, K.K. Likharev, N.N. Malinin, V.A. Svetlitsky : collection of works.* 2017; 116-120. EDN ZRYUQD. (rus.).

26. Demyanushko I.V., Titov O.V., Mikheev P.S., Karpov I.A. Digital modelling of failure of road barrier elements under impact of vehicle collision. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(12):1896-1919. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1896-1919. EDN AHVXLQ. (rus.).

27. Titov O.V. *Development of an experimental and computational complex for validating physical and*

*mathematical models of road barriers for digital modeling of a car impact : dis. ... cand. of technical sciences.* Moscow, 2024; 163. (rus.).

28. Loken A.E. *Establishing Safe Operating Speeds for Autonomous Vehicles: A Case Study from the Automated Skyway Express in Jacksonville, Florida : thesis.* Lincoln, NE, University of Nebraska-Lincoln, 2021.

29. Hirsch T.J. *Analytical Evaluation of Texas Bridge Rails to Contain Buses and Trucks. Research Report No. 230-2.* College Station, TX, Texas Transportation Institute, Texas A&M University, 1978.

30. Faller R.K., Soyland K., Rosson B.T., Stutzman T.M. *TL-1 Curb-Type Bridge Railing for Longitudinal Glulam Timber Decks Located on Low-Volume Roads. MwRSF Research Report No. TRP-03-54-96.* Lincoln, NE, Midwest Roadside Safety Facility, University of Nebraska-Lincoln, 1996.

Received October 22, 2025.

Adopted in revised form on October 27, 2025.

Approved for publication on January 29, 2026.

**BIONOTES:** **Irina V. Demyanushko** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect 64, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 158270, Scopus: 6602540287, ResearcherID: G-5604-2013, ORCID: 0000-0001-6726-1131; demj-ir@mail.ru;

**Ilya A. Karpov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 971215, Scopus: 57209366542, ResearcherID: AAL-8344-2021, ORCID: 0000-0003-2574-2839; ilya.karpov@outlook.com;

**Alexey G. Lokit** — postgraduate student, assistant of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 1207674; Scopus: 57216159090; ResearcherID: IWV-2173-2023; ORCID: 0009-0009-8087-4966; algenlok@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Irina V. Demyanushko — scientific supervision, study concept and design, critical revision and editing of the final manuscript (conceptualization, supervision, writing — review and editing).*

*Ilya A. Karpov — development of vehicle virtual models, support with virtual crash simulations and model calibrations, manuscript editing (software, methodology, validation, writing — review and editing).*

*Alexey G. Lokit — development of barrier virtual models, execution of virtual crash simulations, validation and verification of virtual models, model calibration, data processing, participation in planning and conducting full-scale tests, manuscript drafting and preparation of figures (software, investigation, validation, formal analysis, data curation, visualization, writing — original draft).*

*The authors declare no conflict of interest.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.042.5:539.3

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.373-388

## Исследование напряженно-деформированного состояния конструкции фундамента с учетом влияния повышенных температур на механические характеристики высокопрочного сталефибробетона

Сергей Николаевич Машталер, Виктор Николаевич Левченко,  
Кирилл Александрович Казак

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры — филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (ДОННАСА — филиал НИУ МГСУ); г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, Российская Федерация*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Анализ исследований показывает, что повышенные температуры существенно изменяют физико-механические свойства бетонов, включая высокопрочный сталефибробетон, что снижает достоверность расчетных моделей термически нагруженных конструкций. Совместное действие тепловых и силовых факторов обуславливает вариацию прочностных и деформационных характеристик материала. В этом контексте особый практический интерес представляют сооружения, эксплуатируемые в условиях длительного теплового воздействия. Машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) — основной металлургический агрегат для разлива стали, требует массивных фундаментов, работающих в условиях длительного теплового воздействия, что делает исследование их механических характеристик актуальным.

**Материалы и методы.** Приведены результаты испытаний образцов из высокопрочного сталефибробетона с содержанием фибры  $\mu_{sfb} = 0$  и 2,5 %. Проведена оценка влияния процента фибрового армирования и повышенных температур на основные механические характеристики материала. На основе полученных данных выполнено численное моделирование фундамента МНЛЗ методом конечных элементов с применением диаграммного расчетного метода, учетом физической нелинейности (по кусочно-линейному закону деформирования), реальных условий эксплуатации и температурного режима. Для моделирования использован программный комплекс «Лира-САПР 2020», обеспечивающий учет неоднородности температурно-усадочных деформаций и фактических диаграмм деформирования материала.

**Результаты.** Получены параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) и значения механических свойств высокопрочного сталефибробетона с учетом продолжительности нагрева до +200 °С. Численное моделирование показало, что неоднородное распределение температуры по объему конструкции существенно влияет на НДС элементов. Применение сталефибробетона в качестве вариативного материала позволило уменьшить растягивающие усилия и напряжения, а также повысить трещиностойкость конструкции.

**Выводы.** Введение до 2,5 % стальной фибры улучшает механические свойства при нормальной температуре. Кратковременный нагрев снижает прочность и модуль упругости, а длительное воздействие изменяет комплекс физико-механических характеристик. Анализ НДС фундаментов подтвердил эффективность применения сталефибробетона в условиях теплового воздействия.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** высокопрочный сталефибробетон, кратковременный нагрев, длительный нагрев, прочность, деформации, столбчатые фундаменты, напряженно-деформированное состояние

*Благодарности.* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00637 (URL: <https://rscf.ru/project/25-19-00637/>). Авторы выражают благодарность рецензентам (редакторской коллегии) журнала «Вестник МГСУ» за подробное рассмотрение и достойную оценку выполненных научных исследований.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Машталер С.Н., Левченко В.Н., Казак К.А. Исследование напряженно-деформированного состояния конструкции фундамента с учетом влияния повышенных температур на механические характеристики высокопрочного сталефибробетона // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 3. С. 373–388. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.373-388

*Автор, ответственный за переписку:* Кирилл Александрович Казак, k.a.kazak@donnasa.ru.

## Investigation of the stress-strain state of the foundation structure, taking into account the influence of elevated temperatures on the mechanical characteristics of high-strength steel fibre concrete

**Sergey N. Mashtaler, Viktor N. Levchenko, Kirill A. Kazak**

*Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture — branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) (DonNACEA — branch of National Research University MGSU); Makeyevka, Donetsk People's Republic, Russian Federation*

**ABSTRACT**

**Introduction.** The analysis of existing studies shows that elevated temperatures significantly alter the physical and mechanical properties of concrete, including high-strength steel fibre reinforced concrete, which reduces the reliability of calculation models for thermally loaded structures. The combined action of thermal and mechanical factors leads to variations in the strength and deformation characteristics of the material. In this context, structures operating under long-term thermal exposure are of particular practical interest. Continuous casting machines (CCM), which are the main metallurgical units for steel casting, require massive foundations operating under prolonged thermal effects, making the study of their mechanical characteristics highly relevant.

**Materials and methods.** The paper presents the test results of specimens made of high-strength steel fibre concrete with a fibre content of  $\mu_{sf}$  = 0 and 2.5 %. The influence of the percentage of fibre reinforcement and elevated temperatures on the basic mechanical characteristics of the material is estimated. Based on the data obtained, numerical modelling of the CCM foundation using the finite element method was performed using the diagrammatic calculation method, taking into account physical nonlinearity, real-world operating conditions and temperature conditions. The Lira-CAD 2020 software package was used for modelling, which takes into account the heterogeneity of temperature and shrinkage deformations and the actual deformation diagrams of the material.

**Results.** The parameters of the stress-strain state and the values of mechanical properties for high-strength steel fibre concrete are obtained, taking into account the duration of heating up to +200 °C. Numerical modelling has shown the influence of the heterogeneity of the temperature distribution over the volume of the structure on the stress-strain state of the studied elements. The use of high-strength steel-fibre concrete as a variable material made it possible to reduce the magnitude of tensile forces and stresses, as well as increase the crack resistance of the structure in question.

**Conclusions.** The introduction of up to 2.5 % steel fibre into the composition of high-strength concrete significantly increases its mechanical properties at normal temperatures. Experiments have shown that short-term heating reduces the strength and elastic characteristics, and prolonged temperature exposure changes the complex of physical and mechanical properties of the material. The analysis of the stress-strain state of the foundations confirmed the effectiveness of the use of high-strength steel-fibre concrete in conditions of thermal exposure.

**KEYWORDS:** high-strength steel fibre reinforced concrete, short-term heating, long-term heating, strength, deformation, column-type foundations, stress–strain state

*Acknowledgements.* This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-19-00637 (URL: <https://rscf.ru/project/25-19-00637/>). The team of authors expresses its gratitude to the reviewers (editorial board) of the journal "Vestnik MGSU" for a detailed review and a worthy assessment of the scientific research carried out.

**FOR CITATION:** Mashtaler S.N., Levchenko V.N., Kazak K.A. Investigation of the stress-strain state of the foundation structure, taking into account the influence of elevated temperatures on the mechanical characteristics of high-strength steel fibre concrete. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(3):373-388. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.373-388 (rus.).

*Corresponding author:* Kirill A. Kazak, k.a.kazak@donnasa.ru.

**ВВЕДЕНИЕ**

Развитие промышленного и гражданского строительства обуславливает увеличение производства конструкций, испытывающих различное напряженное состояние. К таким конструкциям можно отнести колонны, балки (ригели), плиты покрытий или перекрытий, фундаменты и т.д. Одним из немаловажных факторов современного строительства является снижение материалоемкости, повышение эффективности применения новых строительных материалов. Высокопрочные бетоны наряду с очевидными преимуществами их использования характеризуются значительной плотностью, преимущественно упругим характером деформирования и повышенной склонностью к хрупкому разрушению.

Использование фибры в качестве дисперсного армирования бетонной смеси позволяет повысить вязкость разрушения бетона, увеличить способность материала перейти от хрупкого характера разрушения к пластичному. Один из основных факторов при-

менения фибрового армирования — качественное повышение прочностных и деформационных характеристик бетона, увеличение трещиностойкости и способности сопротивляться образованию микротрещин. Увеличение значений предельных деформаций сжимаемости и растяжимости также служит преимуществом при эксплуатации конструкций. Согласно данным экспериментальных исследований [1–3], сталефибробетон демонстрирует максимальную эффективность в конструкциях, подверженных комбинированному воздействию силовых и температурных нагрузок<sup>1</sup>. Эта особенность делает его перспективным материалом для применения в условиях интенсивных термических воздействий.

Исследования различных авторов [4–21] свидетельствуют о зависимости параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) сталефибро-

<sup>1</sup> ACI 544.1R–96: State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. Farmington Hills, MI : ACI, 1996. 66 p. (Reapproved 2002).

бетонных конструкций от количества и типа фибрового армирования. В работе [22] показано, что процент армирования существенно влияет на прочность, пластичность и НДС высокопрочного бетона. Кратковременный нагрев значительно меняет поведение бетона, повышая раннюю прочность, пластичность и энергоемкость материала, что подчеркивает актуальность изучения совместного влияния армирования и температурных воздействий на механические характеристики высокопрочного бетона [23].

Обзор научной литературы показывает, что влияние температурных условий на прочность и деформационные свойства сталефибробетона изучено недостаточно, что представляет особую актуальность для промышленных сооружений с высоким тепловыделением. Цель работы состоит в исследовании влияния нагрева до 200 °С и длительности его воздействия на прочностные и деформационные показатели высокопрочного сталефибробетона и в использовании экспериментально полученных диаграмм деформирования, а также в оценке их применимости для моделирования и расчета конструкций столбчатого фундамента машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) на Енакиевском металлургическом заводе (ЕМЗ) ООО «Южный горно-металлургический комплекс» (ООО «ЮГМК») для повышения надежности фундаментов. Метод диаграммного расчета, реализованный через ПК «Лира-САПР 2020», позволил учесть реальные температурные воздействия и определить критические зоны деформаций конструкции.

Численные расчеты столбов фундаментов МНЛЗ продемонстрировали, что неоднородные температурно-усадочные деформации напрямую влияют на НДС конструкции. Данные результаты дают возможность аргументированно рассматривать сталефибробетон как предпочтительный материал для таких условий.

Состав высокопрочного бетона (расход на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси)

The composition of high-strength concrete (consumption per 1 m<sup>3</sup> of concrete mix)

Составляющие бетонной смеси, кг/м <sup>3</sup> Components of the concrete mix, kg/m <sup>3</sup>						Объемный вес, кг/м <sup>3</sup> Volume weight, kg/m <sup>3</sup>	В/Ц W/C	В/В W/B	Щ/общ. CA/t	ФМ + ОММ/Ц SP + ОММ/С
Ц* С*	ОММ** ОММ**	П*** S***	В**** W****	ФМ***** SP*****	Щ***** CA*****					
545	190	660	153	16,8	870	2435	0,28	0,2	0,33	0,38

*Примечание:* \* — цемент – портландцемент марки М500; \*\* — органоминеральный модификатор в виде сухой смеси, состоящий (в % от общего веса) из микрокремнезема в составе Sica Fume (20 %), тонкомолотой золошлаковой смеси Углегорской ТЭС (30 %), суперпластификатора С-3 (2 %), золы-уноса Зуевской ТЭС (48 %); \*\*\* — песок кварцевый с модулем крупности 1,9 мм; \*\*\*\* — вода водопроводная; \*\*\*\*\* — суперпластификатор ФМ794 (Sica Viscocrete5-600); \*\*\*\*\* — щебень гранитный фракции 5–20 мм.

*Note:* \* — cement is M500 grade Portland cement; \*\* — organomineral modifier in the form of a dry mixture, consisting (in % of total weight): silica in Sica Fume (20 %), finely ground ash and slag mixture from Uglegorsk thermal Power plant (30 %), superplasticizer C-3 (2 %), fly ash from Zuyevskaya thermal Power plant (48 %); \*\*\* — quartz sand with a grain size of 1.9 mm; \*\*\*\* — water – tap water; \*\*\*\*\* — superplasticizer FM794 (Sica Viscocrete5-600); \*\*\*\*\* — crushed stone granite fractions of 5–20 mm.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Состав сталефибробетона и конструкции опытных образцов

В качестве базового варианта для выполнения экспериментальных исследований подобран состав высокопрочного бетона, представленный в таблице.

В программу испытаний включены две серии призмных образцов для определения прочности при осевом сжатии и растяжении, различающиеся объемным содержанием стальной фибры: первая серия ( $\mu_{fib} = 0$ ) не содержала фибрового армирования, вторая ( $\mu_{fib} = 2,5$  %) была армирована фиброй в количестве 200 кг/м<sup>3</sup>. Во всех армированных сериях применялась стальная анкерная фибра с загнутыми концами.

Основные испытания проведены на призмных образцах размерами 150 × 150 × 600 мм. Контрольные испытания выполнены на кубических образцах с размером ребра 150 мм. Все тепловые и механические воздействия приложены к бетону в возрасте 28–30 сут.

Для анализа и оценки НДС элементов столбчатого фундамента, а также проверки целесообразности применения высокопрочного сталефибробетона осуществлены сравнительные расчеты конструкции в двух вариантах исполнения:

- с использованием тяжелого бетона проектного класса по прочности В40 (базовый вариант), принят на основании натурного обследования столбчатых фундаментов МНЛЗ ЕМЗ ООО «ЮГМК» (г. Енакиево) [24];
- с применением высокопрочного сталефибробетона с процентом фибрового армирования  $\mu_{fib} = 2,5$  % (модифицированный вариант).

Объект исследования — столбчатый фундамент МНЛЗ ЕМЗ ООО «ЮГМК» (г. Енакиево) на различных этапах технологического процесса.

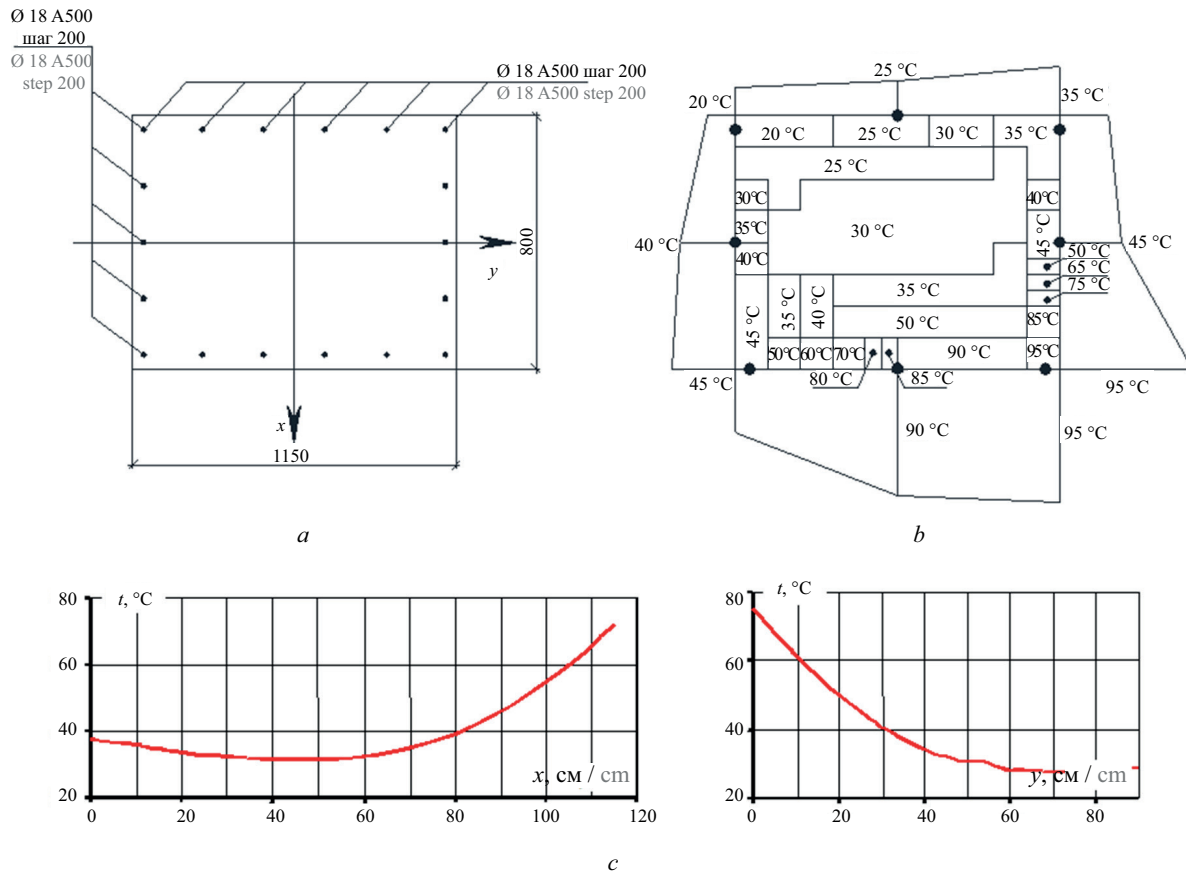


Рис. 1. Схема армирования (а); распределение температуры (b, c) в сечениях конструкции фундамента МНЛЗ  
 Fig. 1. Reinforcement layout (a) and temperature distribution (b, c) in the cross-sections of the CCM foundation structure

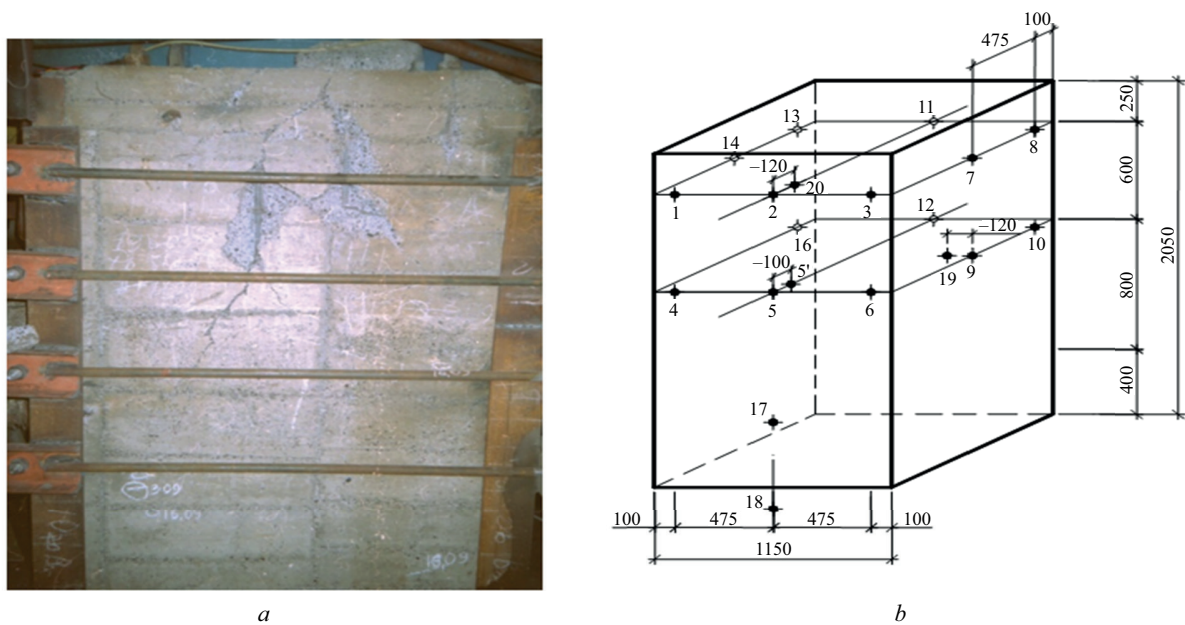


Рис. 2. Конструкция столбчатого фундамента с повреждениями (а) и схема расположения ХК-термопар (b) МНЛЗ ЕМЗ ООО «ЮГМК» г. Енакиево

Fig. 2. Damage to the column foundation structure (a) and layout of CC-thermocouples (b) of the CCM YISW LLC "SMMC" at the Yenakiieve

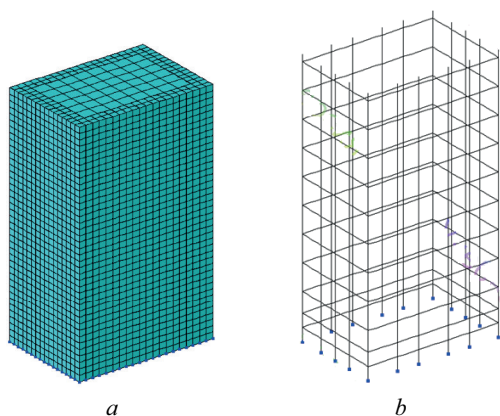


Рис. 3. Общий вид (а) и схема армирования (б) расчетной модели столбчатого фундамента МНЛЗ

Fig. 3. General view (a) and reinforcement layout (b) of the computational model of the column foundation of the CCM

Фундаменты передают нагрузку от вышележащих главных балок и имеют жесткую заделку в нижней части. Сечение фундаментного столба и расположение арматуры представлены на рис. 1, а.

В расчетной модели учтено влияние температурных воздействий и выполняется анализ при совместном действии силовых и тепловых нагрузок. Распределение температуры представлено на рис. 1, б в соответствии с расположением ХК-термопар на рис. 2, б, что позволяет моделировать тепловое поле, приближенное к экспериментальным условиям.

При создании расчетной модели использовались параметры НДС столбов фундаментов МНЛЗ ЕМЗ ООО «ЮГМК», полученные на основании натурных исследований [24] температурных деформаций и фактического распределения температурных полей в объеме конструкций (рис. 1, б, с; рис. 2, б).

В качестве расчетных критериев прочности принят стандартный закон деформирования, используемый в ПК «Лира-САПР 2020», для базового варианта. Для модифицированного варианта применяется фактическая диаграмма деформирования сталефибробетона.

Расчет совместного воздействия температурных и силовых факторов на фундамент выполнялся методом конечных элементов (МКЭ) с использованием ПК «Лира-САПР 2020», при этом учитывалась физическая нелинейность материалов, по кусочно-линейному закону деформирования.

Нелинейные свойства бетона и арматуры учитывались с помощью кусочно-линейного закона деформирования (тип 14). Диаграмма для высокопрочного сталефибробетона с  $\mu_{sfb} = 2,5\%$  при  $t = 90\text{ }^\circ\text{C}$  приведена в разделе «Результаты экспериментальных исследований». Моделирование столбчатого фундамента осуществлялось объемными универсальными пространственными КЭ (тип 236); продольная арматура учитывалась физически нелинейными шаговыми

элементами (тип 204), поперечная — универсальными стержневыми КЭ (тип 10). Параметры диаграммы бетона взяты из исследования [25] и приведены в идеализированном виде на рис. 3.

### Методика испытаний

При проведении экспериментальных исследований для анализа и контроля использовались следующие параметры НДС элемента: прочность на осевое сжатие  $R_{b,sfb}$ , начальный модуль упругости  $E_{b,sfb}$ , величины предельных деформаций сжимаемости и растяжимости ( $\epsilon_{ub,sfb}$  и  $\epsilon_{ubr,sfb}$ ) и коэффициент поперечных деформаций  $\mu_{sfb}$ . Исследуемые факторы влияния: процент объемного фибрового армирования ( $\mu_{sfb} = 0$  и  $2,5\%$ ), температура испытаний ( $20, 90, 150$  и  $200\text{ }^\circ\text{C}$ ), режим нагрева — кратковременный и длительный.

В процессе проведения экспериментальных исследований было испытано 24 куба и 16 образцов-призм, по 3 куба и 2 образца-призмы, на каждый исследуемый диапазон температур ( $+20, +90, +150$  и  $+200\text{ }^\circ\text{C}$ ).

В процессе выполнения эксперимента для измерения деформаций призм применялись индикаторы часового типа. Осуществление температурного нагрева образцов происходило при помощи разработанных электронагревательных элементов (температурных «рубашек»). Скорость набора температуры —  $15\text{ }^\circ\text{C/ч}$ . Кратковременный нагрев до температур  $+90, +150$  и  $+200\text{ }^\circ\text{C}$  проводился на протяжении 15, 13 и 12 ч. Длительный нагрев производился в течение 20–90 сут, что соответствует установленным экспериментальным значениям критического снижения прочности тяжелого бетона в аналогичных температурных условиях [26].

В качестве аналитического описания диаграмм деформирования образцов из высокопрочного и сталефибробетона использованы зависимости Европейского комитета по железобетону (ЕКБ – ФИП)<sup>2</sup>, зависящие от значений прочности  $R_b$ , начального модуля упругости  $E_b$  и предельной сжимаемости  $\bar{\epsilon}_b$  бетона:

$$\sigma = \epsilon_b \cdot E_b \cdot \left[ \frac{1 - \eta/k}{1 + (k - 2)} \right], \quad (1)$$

$$\text{где } \eta = \frac{\epsilon_b}{\bar{\epsilon}_b}; k = \frac{1}{\nu} = \frac{E_b \cdot \bar{\epsilon}_b}{R_b} \approx 1,4. \quad (2)$$

Для случая осевого растяжения, согласно ЕКБ<sup>2</sup>, коэффициент  $k$  в формуле (1) определяется из выражения:

$$k = \frac{2}{3} = \frac{E_{bt} \cdot \bar{\epsilon}_{bt}}{R_{bt}}. \quad (3)$$

<sup>2</sup> Кодекс-образец ЕКБ – ФИП для норм по железобетонным конструкциям. М. : НИИЖБ, 1984. Т. II. 284 с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Результаты экспериментальных исследований

На рис. 4 представлены графики зависимости, характеризующие процесс деформирования и относительное изменение объема образцов-призм из высокопрочного сталефибробетона.

В испытаниях на осевое растяжение средние значения прочности  $R_{bt,sfb}$  образцов-призм с процентами армирования  $\mu_{sfb} = 0$  и 2,5 % составили 3,54 и 4,4 МПа соответственно (прирост — 24 %). Средние величины предельных деформаций удлинения для тех же образцов составили соответственно  $\varepsilon_{bt0} = 0,121 \cdot 10^{-3}$  и  $0,133 \cdot 10^{-3}$  (рис. 5).

Графики влияния продолжительности нагрева и процента фибрового армирования на диаграммы деформирования образцов-призм из высокопрочного сталефибробетона при температурах 90–200 °С приведены на рис. 6, 7.

### Значения характеристик механических свойств контрольных образцов из высокопрочного сталефибробетона в условиях нормальной температуры

Для определения базовых прочностных характеристик в условиях нормальной температуры ис-

пытаны образцы-кубы с ребром 150 мм в возрасте 7 и 28 сут. Значения прочности кубов  $R_{sfb}$  с процентами фибрового армирования  $\mu_{sfb} = 0$  и 2,5 % на 7 сут составили 74,2 и 86,6 МПа, а на 28 сут — 99 и 111 МПа соответственно.

В ходе испытаний призм стандартных размеров  $150 \times 150 \times 600$  мм средние значения прочности  $R_{b,sf}$  при  $\mu_{sfb} = 0$  и 2,5 % составили 83,5 и 101 МПа. Применение в бетонной смеси фибрового армирования с процентом  $\mu_{sfb} = 2,5$  % привело к увеличению прочности на сжатие до 10–21 %.

Для образцов-призм с размерами  $150 \times 150 \times 600$  мм с процентами фибрового армирования  $\mu_{sfb} = 0$  и 2,5 % значения  $E_{b,sfb}$  составили в среднем  $56,7 \cdot 10^3$  и  $71,9 \cdot 10^3$  МПа соответственно.

Величины деформаций предельной сжимаемости для образцов размерами  $150 \times 150 \times 600$  (процент фибрового армирования  $\mu_{sfb} = 0$  и 2,5 %) составили в среднем  $\bar{\varepsilon}_b = 2,6 \cdot 10^{-3}$  и  $2,9 \cdot 10^{-3}$  соответственно. Поперечные деформации —  $0,96 \cdot 10^{-3}$  и  $1,48 \cdot 10^{-3}$  соответственно.

Для образцов-призм  $150 \times 150 \times 600$  мм коэффициент поперечной деформации при нормальной температуре составил  $\mu = 0,17$  и  $0,24$  для  $\mu_{sfb} = 0$  и 2,5 % соответственно.

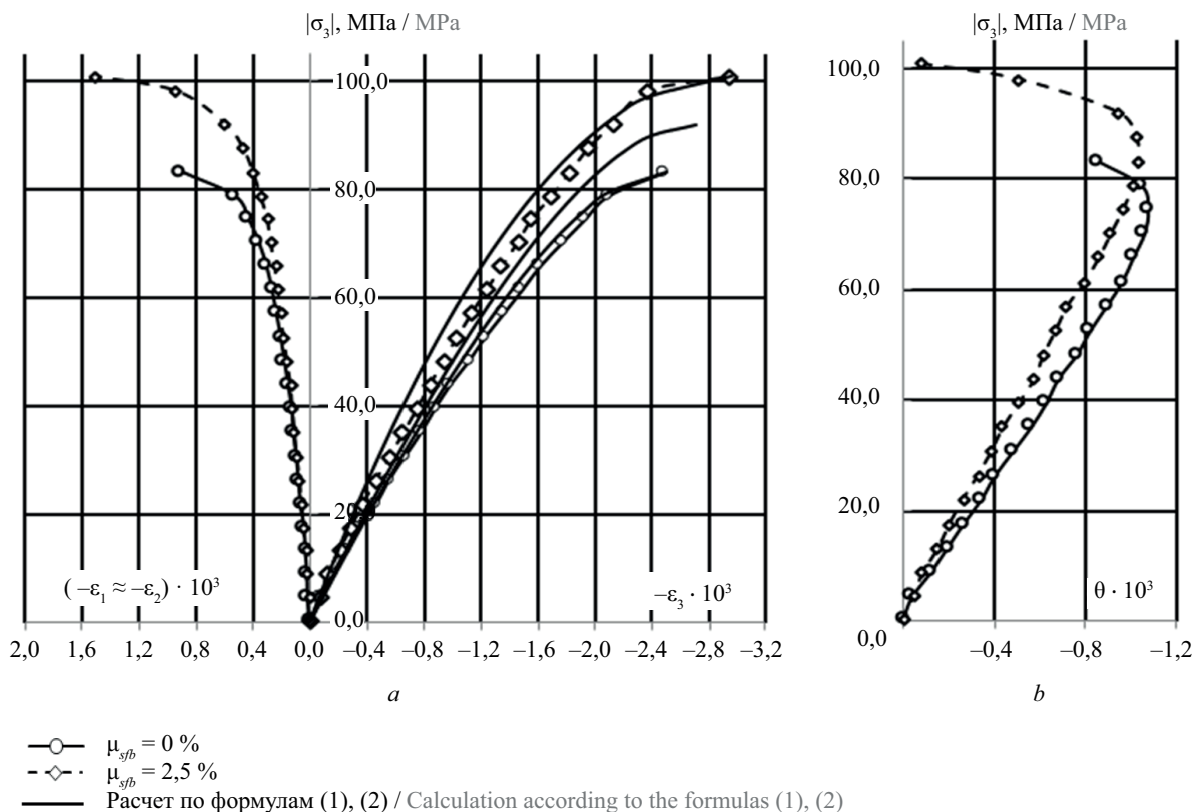


Рис. 4. Экспериментальные диаграммы « $\sigma$ - $\varepsilon$ » (a) и относительного изменения объема  $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$  (b) образцов-призм с размерами  $150 \times 150 \times 600$  мм с процентами фибрового армирования  $\mu_{sfb} = 0$  и 2,5 % при осевом сжатии в условиях нормальной температуры

Fig. 4. Experimental diagrams “ $\sigma$ - $\varepsilon$ ” (a) and relative volume variation  $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$  (b) of prism specimens with dimensions  $150 \times 150 \times 600$  mm with percentages of fibre reinforcement  $\mu_{sfb} = 0$  and 2.5 % under axial compression at normal temperature

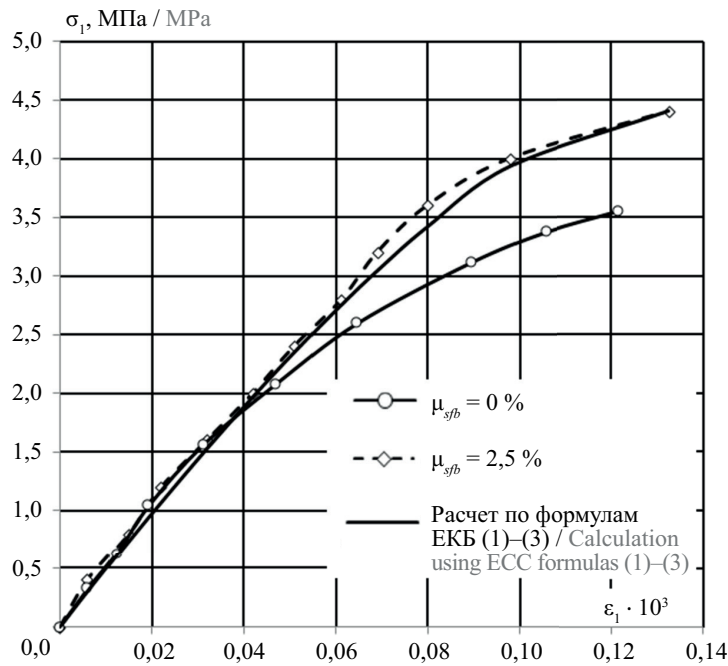


Рис. 5. Диаграмма деформирования « $\sigma - \epsilon$ » высокопрочного сталефибробетона образцов-призм с размерами  $100 \times 100 \times 400$  мм с процентами фибрового армирования  $\mu_{sfb} = 0$  и 2,5 % при осевом растяжении

Fig. 5. Stress-strain diagrams « $\sigma - \epsilon$ » of high-strength steel fibre reinforced concrete prism specimens ( $100 \times 100 \times 400$  mm) with fibre reinforcement ratios of  $\mu_{sfb} = 0$  and 2.5 % under axial tension

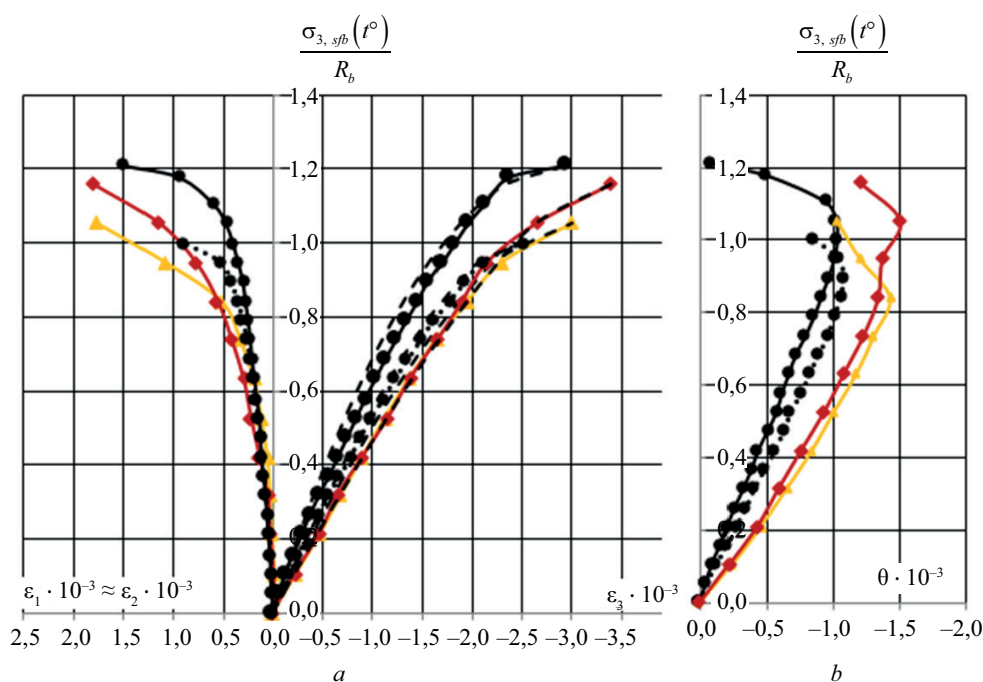
**Влияние повышенных температур +90, +150 и +200 °C на характеристики механических свойств высокопрочного сталефибробетона**

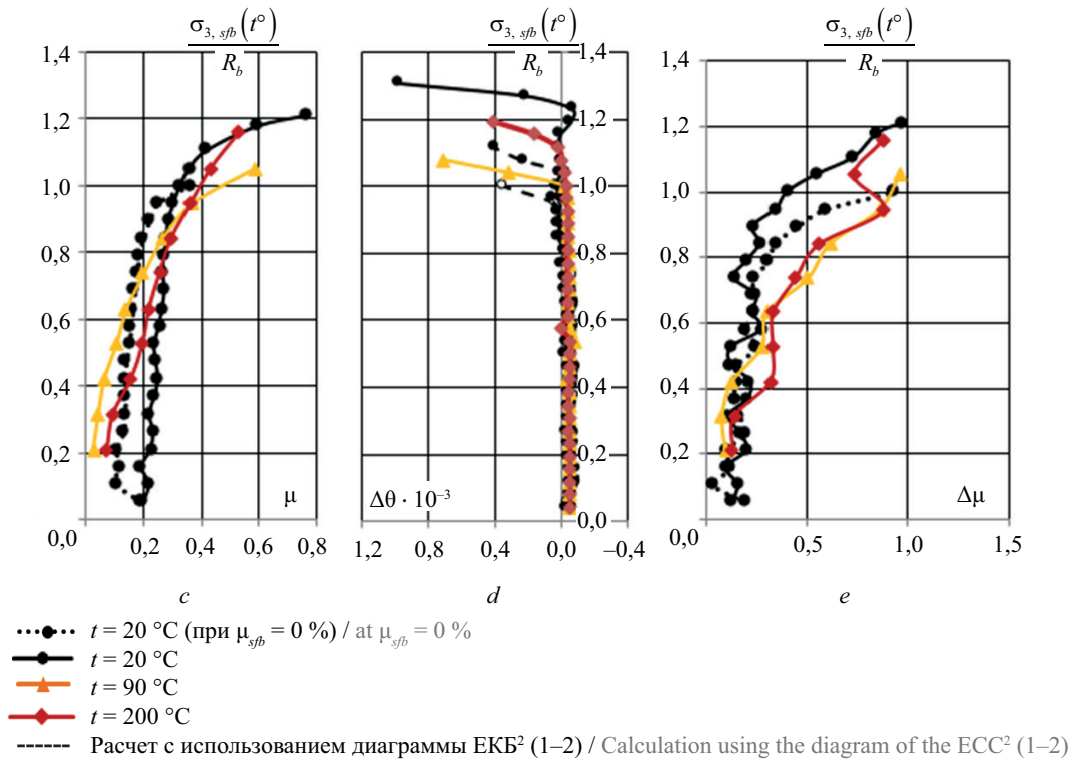
1. Прочность сталефибробетона.

Кратковременный нагрев образцов из высокопрочного бетона с  $\mu_{sfb} = 0$  % до температур +90, +150 и +200 °C привел к снижению прочности на осевое сжатие. Прочность  $R_b$  составила 0,9, 0,99 и 0,95

от прочности образцов, испытанных при условиях нормальной температуры.

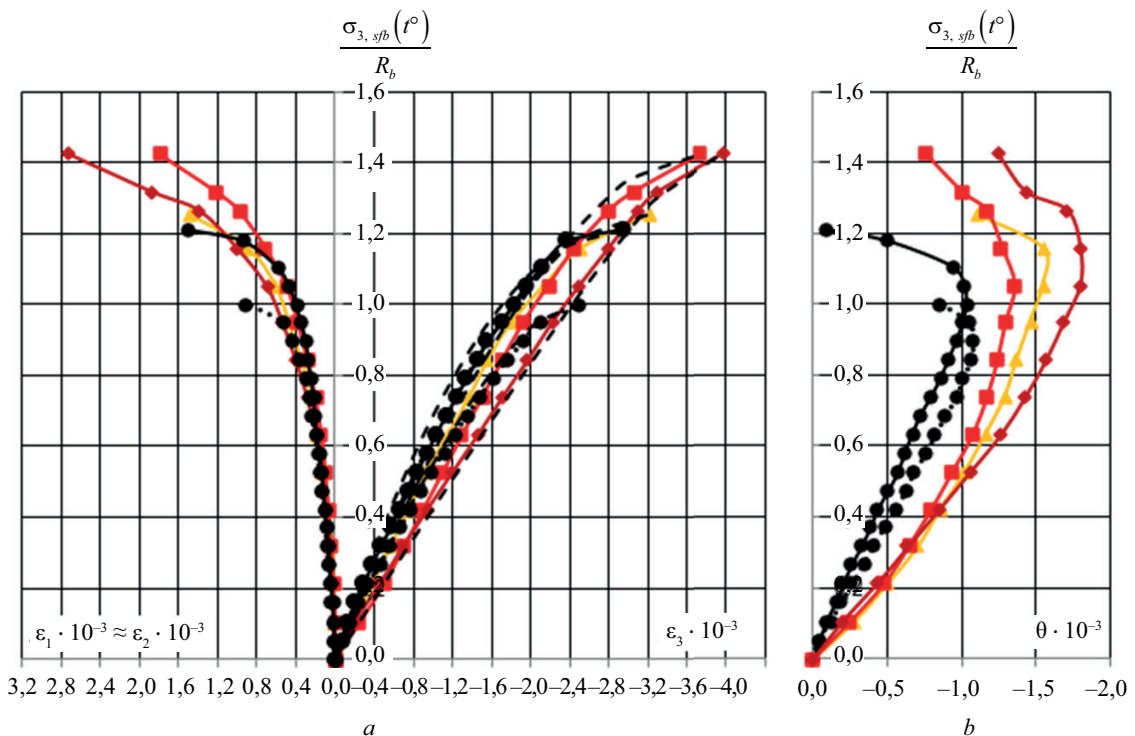
Кратковременный нагрев образцов размерами  $150 \times 150 \times 600$  мм с фибровым армированием  $\mu_{sfb} = 2,5$  % до температур +90 и +200 °C вызвал увеличение значений прочности  $R_{b,sfb}$  на 6 и 16 % соответственно по сравнению с контрольными образцами, испытанными при нормальной температуре (рис. 6).

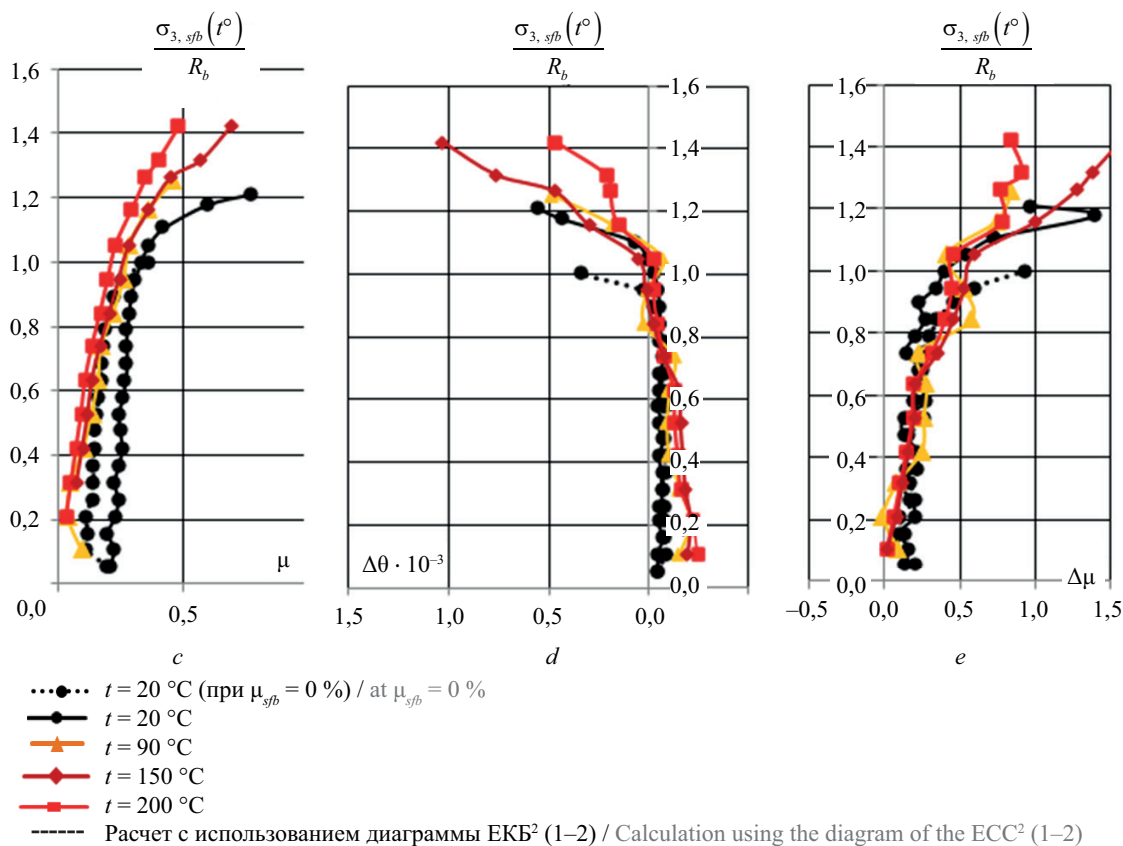




**Рис. 6.** Диаграммы деформирования образцов-призм размерами  $150 \times 150 \times 600$  мм из высокопрочного сталефибробетона с  $\mu_{sfb} = 2,5 \%$  при осевом сжатии при воздействии кратковременного нагрева до температур  $+90$  и  $+200$   $^\circ\text{C}$ : осевые деформации (a); деформации относительного изменения объема  $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$  (b); коэффициенты Пуассона (c); приращение объема (d); приращение коэффициента Пуассона (e)

**Fig. 6.** Diagrams of deformation of prism specimens measuring  $150 \times 150 \times 600$  mm made of high-strength steel fibre concrete with  $\mu_{sfb} = 2.5 \%$  under axial compression when exposed to short-term heating to temperatures of  $+90$  and  $+200$   $^\circ\text{C}$ : axial deformations (a); relative volume change deformations  $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$  (b); Poisson coefficients (c); volume increment (d); Poisson coefficient increment (e)





**Рис. 7.** Диаграммы деформирования образцов-призм размерами  $150 \times 150 \times 600$  мм из высокопрочного сталефибробетона с  $\mu_{sfb} = 2,5\%$  при осевом сжатии при воздействии длительного нагрева до температур  $+90$ ,  $+150$  и  $+200$  °C: осевые деформации (a); деформации относительного изменения объема  $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$  (b); коэффициенты Пуассона (c); приращение объема (d); приращение коэффициента Пуассона (e)

**Fig. 7.** Deformation diagrams of  $150 \times 150 \times 600$  mm prism specimens made of high-strength steel fibre concrete with  $\mu_{sfb} = 2.5\%$  under axial compression when exposed to prolonged heating to temperatures of  $+90$ ,  $+150$  and  $+200$  °C: axial deformations (a); relative volume change deformations  $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$  (b); Poisson coefficients (c); volume increment (d); Poisson coefficient increment (e)

Длительный нагрев приводит к значительному приросту прочности на сжатие — на 25, 42 и 42 % относительно базовых показателей при температуре 20 °C (рис. 7). Наибольшее снижение прочности образцов происходит при температуре  $+90$  °C вследствие возникновения неравномерных деформаций по причине нарушения структурных связей в системе «цементный камень – заполнитель». Температурный нагрев до  $+200$  °C способствует некоторому увеличению прочности (7–10 %) благодаря процессам дополнительной гидратации цементного клинкера.

Длительный прогрев образцов в диапазоне температур  $+90$ – $200$  °C обеспечивает стабилизацию напряжений от температурных воздействий и создает условия эксплуатации конструкций в режиме повышенных температур.

## 2. Модуль упругости.

Кратковременный нагрев образцов  $150 \times 150 \times 600$  мм из высокопрочного сталефибробетона с  $\mu_{sfb} = 2,5\%$  до  $+90$  °C повышает начальный модуль упругости  $E_{b,sfb}$  при осевом сжатии на 10 %, при на-

греве до  $+200$  °C наблюдается снижение на 29 % относительно значений при условиях нормальной температуры.

Длительный нагрев приводит к увеличению значения модуля упругости на 5 % при  $+90$  °C и снижению на 9 и 37 % при температурах  $+150$  и  $+200$  °C соответственно.


## 3. Предельная сжимаемость.

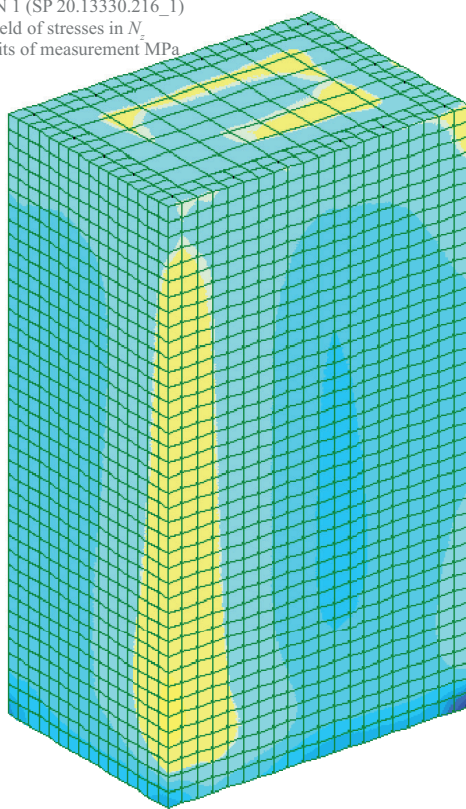
Кратковременный нагрев призм размерами  $150 \times 150 \times 600$  мм с  $\mu_{sfb} = 2,5\%$  до  $+90$  и  $+200$  °C приводил к увеличению значений предельной сжимаемости на 20 и 36 % относительно образцов, испытанных при условиях нормальной температуры (рис. 6, a).

Длительный нагрев до температур  $+90$ ,  $+150$  и  $+200$  °C для образцов  $150 \times 150 \times 600$  мм с  $\mu_{sfb} = 2,5\%$  обуславливает увеличение предельной сжимаемости на 29, 44 и 59 % соответственно (рис. 7, a).


## 4. Коэффициент поперечных деформаций.

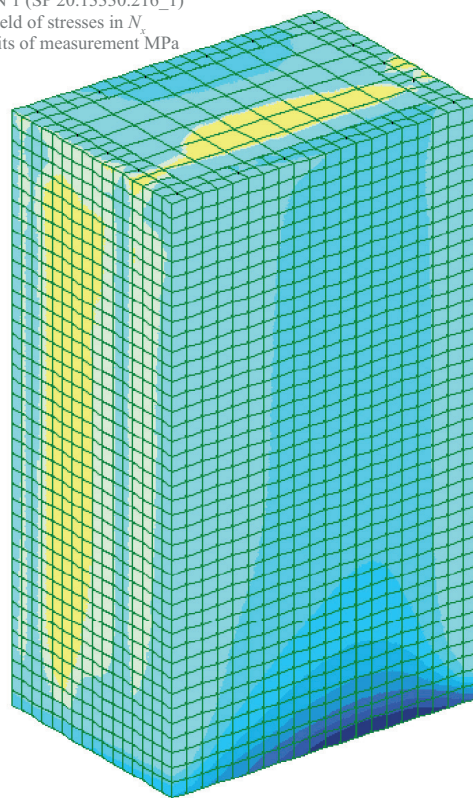
Кратковременный нагрев призм  $150 \times 150 \times 600$  мм с  $\mu_{sfb} = 2,5\%$  до  $+90$  и  $+200$  °C приводил к увеличению  $\mu$  на 6 и 11 % по сравнению с образ-


  
 РСН 1 (СП 20.13330.216\_1) / RSN 1 (SP 20.13330.216\_1)
   
 Изополю напряжений по  $N_z$  / Isofield of stresses in  $N_z$ 
  
 Единица измерения — МПа / Units of measurement MPa



*a*


  
 РСН 1 (СП 20.13330.216\_1) / RSN 1 (SP 20.13330.216\_1)
   
 Изополю напряжений по  $N_x$  / Isofield of stresses in  $N_x$ 
  
 Единица измерения — МПа / Units of measurement MPa

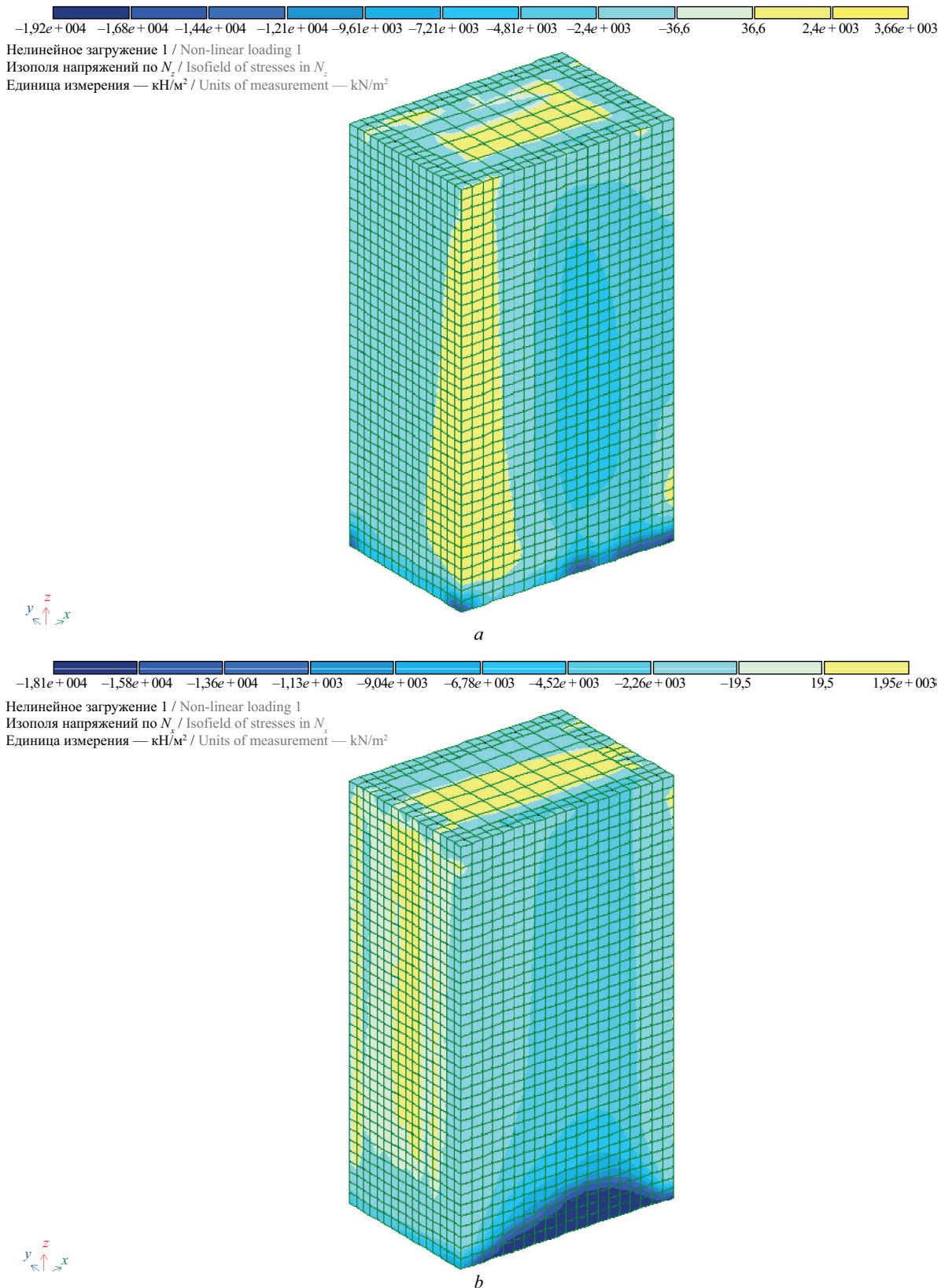


*b*



Рис. 8. Параметры НДС столбчатого фундамента (бетон класса В40): изополя напряжений  $N_z$  (a);  $N_x$  (b)

Fig. 8. Stress-strain state parameters of a columnar foundation (concrete of class B40): stress fields  $N_z$  (a);  $N_x$  (b)



**Рис. 9.** Параметры НДС столбчатого фундамента с учетом неоднородного распределения температуры и деформаций усадки (высокопрочный сталефибробетон с процентом фибрового армирования  $\mu_{sfb} = 2,5\%$ ): изополя напряжений  $N_z$  (a);  $N_x$  (b)

**Fig. 9.** Parameters of the stress-strain state of the columnar foundation, taking into account the heterogeneous temperature distribution and shrinkage deformations (high-strength steel-fibre concrete with a percentage of fibre reinforcement  $\mu_{sfb} = 2.5\%$ ): stress isofields  $N_z$  (a);  $N_x$  (b)

цами, испытанными при условиях нормальной температуры (рис. 6, с).

Длительный нагрев призм  $150 \times 150 \times 600$  мм с  $\mu_{sfb} = 2,5\%$  до  $+90$ ,  $+150$  и  $+200$  °С приводил к повышению  $\mu$  на 16,8, 27,3 и 32 % по сравнению с образцами, испытанными при условиях нормальной температуры (рис. 7, с).

Анализ диаграмм деформирования высокопрочного сталефибробетона, полученных в результате экспериментальных исследований, выявил зависимость механических характеристик от длительности нагрева и геометрических параметров образцов. Для данного материала характерно сохранение упругих свойств в диапазоне 0,8–0,9 от призмной прочности. На финальной стадии нагружения при достижении напряжений свыше  $0,8R_{b,sfb}(f^o)$  наблюдалось объемное расширение (дилатация), обусловленное сдерживающим действием фибровой арматуры против развития растягивающих деформаций.

К конструкциям, работающим в условиях длительного неравномерного нагрева, относят балки, плиты, колонны, оболочки, стеновые панели и массивные блоки. Такие элементы характерны для котельных установок, теплотехнических цехов, дымовых и вентиляционных каналов, технологических платформ и опор оборудования. Продолжительное тепловое воздействие вызывает неравномерные температурные деформации, перераспределение внутренних усилий, появление трещин и снижение жесткости. Для оценки их надежности выполняют анализ НДС с учетом реальных температурных полей, используя нелинейные термомеханические модели, отражающие ползучесть, релаксацию напряжений и термоупругие эффекты.

Выполненные натурные исследования [24] показали, что в ходе эксплуатации конструкции столбчатых фундаментов получили характерные повреждения в виде трещин шириной раскрытия до  $a_{crc} = 1,5$  мм и локальных участков повреждения защитного слоя бетона (рис. 2, а). Неравномерность теплового воздействия на грани конструкции приводит к возникновению различных по сечению температурных градиентов. При совместном действии температурно-силовых воздействий, не совпадающих с осями симметрии поперечного сечения, в конструкции фиксируется возникновение сложной формы напряженного состояния — косоое внецентренное сжатие (рис. 1, б).

Полученные величины продольной силы и изгибающего момента, рассчитанные от силовых воздействий на основе статического расчета, составили соответственно  $N_z = 1,1$  МН и  $M_x = 0,008$  МН·м [24].

Согласно результатам статического расчета фундамента с использованием бетона класса В40 (базовый вариант) средние продольные напряжения  $N_z$  (рис. 8, а) составили 27 МПа, что превышает сопротивление бетона на сжатие  $R_b = 22$  МПа. Величина максимальных растягивающих напряже-

ний составила 10 МПа, что значительно превышает расчетное сопротивление бетона растяжению  $R_{bt} = 1,4$  МПа, что говорит об образовании и раскрытии трещин до  $a_{crc} = 2,0$  мм. Сопоставление с данными натурных исследований (рис. 2, а) свидетельствует о наличии III категории технического состояния конструкции (ограниченно работоспособное) и ее непригодности для нормальной эксплуатации.

С целью возможного ограничения раскрытия трещин  $a_{crc}$  и снижения растягивающих напряжений в качестве вариантного проектирования использовался высокопрочный сталефибробетон с процентом фибрового армирования  $\mu_{sfb} = 2,5\%$ .

Моделирование столбчатого фундамента с учетом совместного действия температурно-усадочных воздействий свидетельствует, что использование сталефибробетона с  $\mu_{sfb} = 2,5\%$  снижает величины средних продольных напряжений  $N_z$  до 19,2 МПа, а максимальные растягивающие напряжения не превышают 3,6 МПа (рис. 9). Данные значения превышают экспериментально определенное сопротивление растяжению для высокопрочного бетона с  $\mu_{sfb} = 2,5\%$   $R_{bt} = 3,2$  МПа, что позволяет прогнозировать возникновение трещин. Полученные величины ширины раскрытия трещин  $a_{crc} = 0,19$  мм, что не превышает нормативного значения  $a_{crc,ul} = 0,3$  мм.

Анализ НДС элементов столбчатого фундамента показал, что применение высокопрочного стеклофибробетона оправдано для конструкций, эксплуатируемых в условиях комбинированного температурно-влажностного воздействия.

Численные исследования столбов МНЛЗ предоставили достоверные сведения о влиянии неоднородности температурно-усадочных напряжений на поведение конструкции. Распределение этих напряжений проиллюстрировано на рис. 8, 9.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование стальной фибры в объеме до 2,5 % при производстве высокопрочного бетона обеспечивает улучшение его механических свойств при нормальной температуре. Опытные данные свидетельствуют об увеличении прочности при осевом сжатии на величину до 21 %, на растяжение — до 24 %. Значения начального модуля упругости увеличиваются до 27 %, предельной сжимаемости — на 18 %, предельной растяжимости — до 10 %, а коэффициент поперечной деформации возрастает до 41 % по сравнению с неармированным высокопрочным бетоном.

Экспериментальные данные показали разнонаправленное влияние кратковременного нагрева на механические характеристики сталефибробетона. В диапазоне исследованных температур стандартные образцы демонстрировали снижение прочности при сжатии до 10 %, при растяжении до 27 %, модуля упругости до 37 % и коэффициента поперечной деформации до 20 %, в то время как для образцов

с фибровым армированием ( $\mu_{sfb} = 2,5\%$ ) при температурах  $+90$  и  $+200$  °С зафиксировано увеличение прочности при сжатии на 6 и 16 % соответственно. Деформационные характеристики материала увеличивались: сжимаемость на 36 %, растяжимость — в 2,7 раза по сравнению с контрольными образцами без армирования ( $\mu_{sfb} = 0\%$ ) при температуре 20 °С.

Длительное температурное воздействие на образцы из высокопрочного сталефибробетона способствует изменению комплекса его физико-механических характеристик. В исследуемых температурах предел прочности при сжатии увеличивается до 41 %, в то время как модуль упругости снижается настолько же, а предел сжимаемости и коэффициент поперечной деформации увеличиваются на 59 и 32 % соответственно.

Статический расчет столбчатых фундаментов МНЛЗ, выполненный для сооружений ЕМЗ ООО «ЮГМК» (г. Енакиеве), показал, что фактические значения напряжений достигают 27 МПа, превышая расчетное сопротивление бетона класса В40 ( $R_b = 22$  МПа), а величина максимальных растяги-

вающих напряжений достигает 10 МПа, так же превышая расчетное сопротивление бетона указанного класса ( $R_{bt} = 1,4$  МПа). Анализ полученных изополей напряжений подтвердил выявленные при обследовании дефекты и зоны концентрации напряжений.

Применение высокопрочного сталефибробетона с  $\mu_{sfb} = 2,5\%$  в качестве материала для столбчатых фундаментов МНЛЗ вместо бетона базового класса прочности В40 позволяет снизить величины средних продольных напряжений  $N_z$  до 19,2 МПа, а максимальные растягивающие напряжения не превышают 3,6 МПа. Ширина раскрытия трещин не превышает 0,19 мм, что не выходит за рамки нормативного значения  $a_{cr,ul} = 0,3$  мм.

Результаты анализа НДС элементов МНЛЗ подтверждают возможность эффективного использования высокопрочного сталефибробетона в конструкциях, подвергающихся термовлажностным воздействиям. Примененный расчетный подход, учитывающий физическую нелинейность материала, обеспечил получение надежных оценок влияния температурно-усадочной неоднородности на поведение конструкции.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мишина А.В., Чилин И.А., Андрианов А.А. Физико-технические свойства сверхвысокопрочного сталефибробетона // Вестник МГСУ. 2011. № 3–2. С. 159. EDN OWCDNF.
2. Korsun V., Korsun A., Volkov A. Characteristics of mechanical and rheological properties of concrete under heating conditions up to 200 °C // MATEC Web of Conferences. 2013. Vol. 6. P. 07002. DOI: 10.1051/mateconf/20130607002
3. Li P., Feng J., Gu J., Duan S. Coupled Effects of High Temperature and Steel Fiber Content on Energy Absorption Properties of Concrete // Materials. 2024. Vol. 17. Issue 14. P. 3440. DOI: 10.3390/ma17143440
4. Агапов В.П., Маркович А.С., Дхар П., Голишевская Д.А. Напряженно-деформированное состояние сталефибробетона при сжатии с учетом разгрузки из области неупругих деформаций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 2. С. 170–181. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-2-170-181. EDN XTFTZA.
5. Денисов А.В., Зайцев Д.В. Прогнозирование стойкости сталефибробетонов к термическому воздействию при различных параметрах дисперсного армирования // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5 (89). С. 433–472. EDN JQDVWK.
6. Дьячук Е.В. Оценка напряженно-деформированного состояния железобетонной колонны при армировании сталефибробетоном // Бутаковские чтения : сб. ст. III Всеросс. с междунар. участием молодежной конф. 2023. С. 269–270. EDN QWDVDI.
7. Дьячук Е.В. Характеристики и основные показатели сталефибробетона промышленного применения // Энергетика и энергосбережение: теория и практика : сб. мат. VIII Междунар. науч.-практ. конф. в рамках десятилетия науки и технологий в Российской Федерации. 2024. С. 133.1–133.3. EDN XTIXGG.
8. Капустин Д.Е. Зависимость полных диаграмм деформирования сталефибробетонов при осевом растяжении от параметров фибрового армирования // Инженерный вестник Дона. 2021. № 7 (79). С. 473–485. EDN ZAQEAR.
9. Корсаков Н.В., Корсакова Т.И. Анализ долговечности сталефибробетонных конструкций в условиях знакопеременных температур // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2023. № 6–3 (81). С. 122–126. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-6-3-122-126. EDN IWWKWE.
10. Мишина А.В. Изменение физико-механических характеристик высокопрочного сталефибробетона во времени // Строительство и реконструкция. 2011. № 6 (38). С. 70–74. EDN PAJHRV.
11. Агапов В.П., Маркович А.С., Дхар П., Голишевская Д.А. Напряженно-деформированное состояние сталефибробетона при сжатии с учетом разгрузки из области неупругих деформаций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 2. С. 170–181. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-2-170-181. EDN XTFTZA.
12. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Развитие метода испытания трещиностой-

кости сталефибробетона // Экономика строительства. 2023. № 9. С. 132–137. EDN AABQ GK.

13. Руднов В.С., Герасимова Е.С. Влияние эффективности дисперсного армирования на призмную прочность тяжелых бетонов // Инженерный вестник Дона. 2020. № 8 (68). С. 223–231. EDN RIOZ XJ.

14. Хегай А.О., Кирилин Н.М., Хегай Т.С., Хегай О.Н. Экспериментальные исследования деформативных свойств сталефибробетона повышенных классов // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 77–82. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-77-82. EDN NTWMLK.

15. Abadel A. Residual compressive strength of plain and fiber reinforced concrete after high-temperature exposure // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2022. Vol. 16. P. 48.

16. Abdi Moghadam M., Izadifard R.A. Prediction of the Tensile Strength of Normal and Steel Fiber Reinforced Concrete Exposed to High Temperatures // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2021. Vol. 15. Issue 1. DOI: 10.1186/s40069-021-00485-6

17. He F., Biolzi L., Carvelli V., Feng X. A review on the mechanical characteristics of thermally damaged steel and polypropylene hybrid fiber-reinforced concretes // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2024. Vol. 24. Issue 2. DOI: 10.1007/s43452-024-00880-2

18. He X., Xiang W., Peng X., Dan Y. Axial Compression Performance and Residual Strength Calculation of Concrete-Encased CFST Composite Columns Exposure to High Temperature // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. Issue 1. P. 480. DOI: 10.3390/app12010480

19. Khalil W.I. Influence of High Temperature on Steel Fiber Reinforced Concrete // Journal of Engineering and Development. 2006. Vol. 10. Issue 2. Pp. 139–144.

20. Liang J., Liu K., Wang C., Wang X., Liu J. Mechanical properties of steel fiber-reinforced rubber con-

crete after elevated temperature // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Issue 1. DOI: 10.1038/s41598-024-80458-3

21. Zhang P., Kang L., Wang J., Guo J., Hu S., Ling Y. Mechanical Properties and Explosive Spalling Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Exposed to High Temperature : a Review // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. Issue 7. P. 2324. DOI: 10.3390/app10072324

22. Тамразян А.Г. Анализ поведения спирально армированных железобетонных колонн из высокопрочного бетона при центральном сжатии // Железобетонные конструкции. 2025. Т. 11. № 3. С. 3–20. DOI: 10.22227/2949-1622.2025.3.3-20. EDN CECGTG.

23. Kharun M., Klyuev S., Koroteev D., Chidighikaobi P.C., Fediuk R., Olisov A. et al. Heat Treatment of Basalt Fiber Reinforced Expanded Clay Concrete with Increased Strength for Cast-In-Situ Construction // Fibers. 2020. Vol. 8. Issue 11. P. 67. DOI: 10.3390/fib8110067

24. Калмыков Ю.Ю. Напряженно-деформированное состояние элемента железобетонного фундамента при неоднородном нагреве // Современное промышленное и гражданское строительство. 2007. Т. 3. № 1. С. 37–44. EDN LALBHT.

25. Корсун В.И., Мауталер С.Н. Влияние повышенных до 200 °С температур на характеристики физико-механических свойств высокопрочного сталефибробетона // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году : сб. науч. тр. Российской академии архитектуры и строительных наук. 2018. Т. 2. С. 265–274. DOI: 10.22337/9785432302663-265-274. EDN ODYUFO.

26. Корсун В.И. Напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций в условиях температурных воздействий. Макеевка : ДонГАСА, 2003. 153 с.

Поступила в редакцию 14 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 3 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 3 февраля 2026 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Сергей Николаевич Машталер — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных конструкций; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры — филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (ДОННАСА — филиал НИУ МГСУ); 286123, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, ул. Державина, д. 2; SPIN-код: 9239-8100, РИНЦ ID: 787062; s.n.mashtaler@donnasa.ru;

Виктор Николаевич Левченко — кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных конструкций; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры — филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (ДОННАСА — филиал НИУ МГСУ); 286123, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, ул. Державина, д. 2; SPIN-код: 4962-6958, РИНЦ ID: 582467; v.n.levchenko@donnasa.ru;

Кирилл Александрович Казак — аспирант, ассистент кафедры железобетонных конструкций; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры — филиал Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (ДОННАСА — филиал НИУ МГСУ); 286123, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, ул. Державина, д. 2; SPIN-код: 4473-3378, РИНЦ ID: 1311436; k.a.kazak@donnasa.ru.

Вклад авторов:

Маиталер С.Н. — научное руководство, идея, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Левченко В.Н. — научное руководство, идея, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Казак К.А. — написание исходного текста статьи, обработка результатов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Mishina A.V., Chilin I.A., Andrianov A.A. Physico-technical properties of high performance steel fiber reinforced concrete. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 3-2:159. EDN OWCDNF. (rus.).
2. Korsun V., Korsun A., Volkov A. Characteristics of mechanical and rheological properties of concrete under heating conditions up to 200 °C. *MATEC Web of Conferences*. 2013; 6:07002. DOI: 10.1051/matec-conf/20130607002
3. Li P., Feng J., Gu J., Duan S. Coupled Effects of High Temperature and Steel Fiber Content on Energy Absorption Properties of Concrete. *Materials*. 2024; 17(14):3440. DOI: 10.3390/ma17143440
4. Agapov V.P., Markovich A.S., Dkhar P., Golishevskaya D.A. Stress-strain state of steel fiber-reinforced concrete under compression taking into account unloading from inelastic region. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024; 20(2):170-181. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-2-170-181. EDN XTFTZA. (rus.).
5. Denisov A.V., Zaitsev D.V. Prediction of the resistance of steel fiber concrete to thermal effects at various parameters of dispersed reinforcement. *Engineering Journal of Don*. 2022; 5(89):433-472. EDN JQDVWK. (rus.).
6. Dyachuk E.V. Assessment of stress-strain state of reinforced concrete column with steel fiber reinforcement. *Butakov Readings : collection of papers of the III All-Russian Youth Conference with international participation*. 2023; 269-270. EDN QWDVDI. (rus.).
7. Dyachuk E.V. Characteristics and key indicators of steel fiber reinforced concrete for industrial applications. *Power Engineering and Energy Saving: Theory and Practice : collection of Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference within the framework of the Decade of Science and Technology in the Russian Federation*. 2024; 133.1-133.3. EDN XTIXGG. (rus.).
8. Kapustin D.E. Dependence of the complete diagrams of deformation of steel fiber reinforced concrete under axial tension from the parameters of fiber reinforcement. *Engineering Journal of Don*. 2021; 7(79):473-485. EDN ZAQEAR. (rus.).
9. Korsakov N.V., Korsakova T.I. Analysis of durability of steel-fiber concrete structures under conditions of sign-variable temperatures. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2023; 6-3(81):122-126. DOI: 10.24412/2500-1000-2023-6-3-122-126. EDN IWWKWE. (rus.).
10. Mishina A.V. Change in the physical and mechanical properties of high-strength steel fibro concrete in the course of time. *Building and Reconstruction*. 2011; 6(38):70-74. EDN PAJHRV. (rus.).
11. Agapov V.P., Markovich A.S., Dkhar P., Golishevskaya D.A. Stress-strain state of steel fiber-reinforced concrete under compression taking into account unloading from inelastic region. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024; 20(2):170-181. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-2-170-181. EDN XTFTZA. (rus.).
12. Pukharensko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Development of a method for testing the crack resistance of steel fiber reinforced concrete. *Construction Economics*. 2023; 9:132-137. EDN AABQ GK. (rus.).
13. Rudnov V.S., Gerasimova E.S. Effect of the efficiency of dispersed reinforcement on the prismatic strength of heavy concretes. *Engineering Journal of Don*. 2020; 8(68):223-231. EDN RIOZXJ. (rus.).
14. Khagai A.O., Kirilin N.M., Khagai T.S., Khagai O.N. Experimental investigation of stress-strain properties of steel fiber reinforced concrete of the higher classes. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 6(83):77-82. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-77-82. EDN NTWMLK. (rus.).
15. Abadel A. Residual compressive strength of plain and fiber reinforced concrete after high-temperature exposure. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2022; 16:48.
16. Abdi Moghadam M., Izadifard R.A. Prediction of the Tensile Strength of Normal and Steel Fiber Reinforced Concrete Exposed to High Temperatures. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2021; 15(1). DOI: 10.1186/s40069-021-00485-6
17. He F., Biolzi L., Carvelli V., Feng X. A review on the mechanical characteristics of thermally damaged steel and polypropylene hybrid fiber-reinforced concretes. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2024; 24(2). DOI: 10.1007/s43452-024-00880-2
18. He X., Xiang W., Peng X., Dan Y. Axial Compression Performance and Residual Strength Calculation of Concrete-Encased CFST Composite Columns Exposure to High Temperature. *Applied Sciences*. 2022; 12(1):480. DOI: 10.3390/app12010480

19. Khalil W.I. Influence of High Temperature on Steel Fiber Reinforced Concrete. *Journal of Engineering and Development*. 2006; 10(2):139-144.
20. Liang J., Liu K., Wang C., Wang X., Liu J. Mechanical properties of steel fiber-reinforced rubber concrete after elevated temperature. *Scientific Reports*. 2025; 15(1). DOI: 10.1038/s41598-024-80458-3
21. Zhang P., Kang L., Wang J., Guo J., Hu S., Ling Y. Mechanical Properties and Explosive Spalling Behavior of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Exposed to High Temperature : a Review. *Applied Sciences*. 2020; 10(7):2324. DOI: 10.3390/app10072324
22. Tamrazyan A.G. Analysis of the behavior of spirally reinforced high-strength concrete columns under central compression. *Reinforced Concrete Structures*. 2025; 11(3):3-20. DOI: 10.22227/2949-1622.2025.3.3-20. EDN CECGTG. (rus.).
23. Kharun M., Klyuev S., Koroteev D., Chiadighikaobi P.C., Fediuk R., Olisov A. et al. Heat Treatment of Basalt Fiber Reinforced Expanded Clay Concrete with Increased Strength for Cast-In-Situ Construction. *Fibers*. 2020; 8(11):67. DOI: 10.3390/fib8110067
24. Kalmykov Yu.Yu. Stressed-deformed state of a reinforced foundation element at uneven heating. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2007; 3(1):37-44. EDN LALBHT. (rus.).
25. Korsun V., Mashtaler S. The influence of high temperatures up to 200 °C characteristics of physical and mechanical properties of high-strength steel fiber reinforced concrete. *Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2017 : collection of scientific papers of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. 2018; 2:265-274. DOI: 10.22337/9785432302663-265-274. EDN ODYUFO. (rus.).
26. Korsun V.I. *Stress-strain state of reinforced concrete structures under thermal exposure*. Makeyevka, DonGASA, 2003; 153. (rus.).

Received November 14, 2025.

Adopted in revised form on February 3, 2026.

Approved for publication on February 3, 2026.

**B I O N O T E S :** **Sergey N. Mashtaler** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete Structures; **Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture — branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) (DonNACEA — branch of National Research University MGSU)**; 2 Derzhavina st., Makeevka, 286123, Donetsk People's Republic, Russian Federation; SPIN-code: 9239-8100, ID RSCI: 787062; s.n.mashtaler@donnasa.ru;

**Viktor N. Levchenko** — Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete Structures; **Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture — branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) (DonNACEA — branch of National Research University MGSU)**; 2 Derzhavina st., Makeevka, 286123, Donetsk People's Republic, Russian Federation; SPIN-code: 4962-6958, ID RSCI: 582467; v.n.levchenko@donnasa.ru;

**Kirill A. Kazak** — postgraduate student, assistant of the Department of Reinforced Concrete Structures; **Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture — branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) (DonNACEA — branch of National Research University MGSU)**; 2 Derzhavina st., Makeevka, 286123, Donetsk People's Republic, Russian Federation; SPIN-code: 4473-3378, ID RSCI: 1311436; k.a.kazak@donnasa.ru.

*Authors' contribution:*

*Sergey N. Mashtaler — scientific guidance, idea, scientific text editing, final conclusions.*

*Viktor N. Levchenko — scientific guidance, idea, scientific text editing, final conclusions.*

*Kirill A. Kazak — writing the source text of the article, processing the research results.*

*The authors declare no conflict of interest.*

## Влияние восковых температуропонижающих добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 на долговечность асфальтобетона

Ольга Анатольевна Михайлова, Валентина Васильевна Ядыкина,  
Андрей Евгеньевич Акимов

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В условиях постоянного повышения требований к качеству, экономичности и экологичности материалов для дорожного строительства актуальным является получение теплых асфальтобетонных смесей (АБС) с улучшенными характеристиками. При подборе технологии и состава теплой АБС важны оценка эксплуатационных свойств и расчет срока службы асфальтобетона.

**Материалы и методы.** Исследовано влияние комплексной добавки Вискодор ПВ-2 в сравнении с известной импортной восковой добавкой Licomont BS-100 на физические и эксплуатационные свойства теплой АБС марки А16Вн. В качестве исходного битума использовали битум БНД 70/100, в составе минеральной части АБС — щебень и песок из отсевов дробления гранитных пород, а также известняковый минеральный порошок МП-2. Для изучения характеристик и долговечности асфальтобетона применяли методики в соответствии с актуальными стандартами.

**Результаты.** Приведены результаты оценки воздействия исследуемых восковых добавок на уплотняемость АБС при более низких температурах формования, чем контрольная горячая асфальтобетонная смесь. Проведено сравнение устойчивости к воздействию нагрузок контрольного образца асфальтобетона без добавок и образцов с исследуемыми добавками. На основании полученных данных произведен расчет срока службы тестируемых образцов асфальтобетона по критерию устойчивости к пластическим деформациям.

**Выводы.** Установлено, что исследуемые добавки позволяют не только снизить температуру приготовления и уплотнения АБС, но и улучшить качественные характеристики асфальтобетона: коэффициент водостойкости, устойчивость к действию нагрузок и пластическим деформациям. Существенно повышается срок службы дорожного полотна. Выявлено, что разработанная многокомпонентная добавка не только не уступает, а значительно превосходит по эффективности импортную.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** асфальтобетонная смесь, битумное вяжущее, эксплуатационные свойства, температуропонижающая добавка, воск, битум, устойчивость к колееобразованию

*Благодарности.* В работе использовано измерительное оборудование, предоставленное Центром высоких технологий Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Михайлова О.А., Ядыкина В.В., Акимов А.Е. Влияние восковых температуропонижающих добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 на долговечность асфальтобетона // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 3. С. 389–398. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.389-398

Автор, ответственный за переписку: Ольга Анатольевна Михайлова, mihaylovalymar@mail.ru.

## Influence of wax temperature-reducing additives Viscodor PV-2 and Licomont BS-100 on the durability of asphalt concrete

Ol'ga A. Mihailova, Valentina V. Yadykina, Andrej E. Akimov

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov);  
Belgorod, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** In the conditions of constant increase of requirements to quality, economy and environmental friendliness of construction materials for road construction it is urgent to obtain warm asphalt concrete mixtures with improved characteristics. When selecting the technology and composition for warm asphalt concrete mixes, an important task is to evaluate the operational properties and calculate the service life of asphalt concrete.

**Materials and methods.** In the paper the influence of complex additive Viscodor PV-2 in comparison with known imported wax additive Licomont BS-100 on physical and operational properties of warm asphalt concrete mixture of A16Vn grade

was investigated. BND 70/100 bitumen was used as the initial bitumen, crushed stone and granite rock crushing screenings and limestone mineral powder MP-2 were used in the composition of the mineral part of the asphalt-concrete mixture. To investigate the physical and operational properties of the asphalt concrete mixture, methods were used in accordance with the current standards.

**Results.** The results of evaluation of the effect of the investigated wax additives on the compactibility of asphalt concrete mixture at lower molding temperatures than the control hot asphalt concrete mixture are presented. A comparison of load resistance of the control specimen of asphalt concrete without additives and specimens with the investigated additives was carried out. Based on the obtained data, the service life of the tested asphalt concrete specimens was calculated by the criterion of resistance to plastic deformations.

**Conclusions.** It was established that the investigated additives allow not only to reduce the temperature of preparation and compaction of asphalt-concrete mixture, but also essentially improve qualitative characteristics of asphalt concrete: water resistance coefficient, resistance to loads and plastic deformations. As a consequence, increase the service life of the road surface. It is revealed that the developed complex additive Viskodor PV-2 is not inferior and even significantly exceeds the efficiency of imported additive Licomont BS-100.

**KEYWORDS:** asphalt concrete mix, bituminous binder, performance properties, temperature reducing additive, wax, bitumen, rutting resistance

*Acknowledgements.* The work was performed using the equipment on the basis of the Center of High Technologies of Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov.

**FOR CITATION:** Mihailova O.A., Yadykina V.V., Akimov A.E. Influence of wax temperature-reducing additives Viscodor PV-2 and Licomont BS-100 on the durability of asphalt concrete. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(3):389-398. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.389-398 (rus.).

*Corresponding author:* Olga A. Mihailova, mihaylovalymar@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с постоянно растущими требованиями к качеству, экономичности и экологичности материалов для строительства дорог актуальна задача снижения энергоемкости производства асфальтобетонных смесей (АБС) с одновременным повышением их эксплуатационных характеристик [1]. Перспективное направление в дорожной индустрии — применение технологий теплых асфальтобетонных смесей, температуры приготовления и укладки которых на 20–30 °С ниже, чем при производстве традиционных горячих асфальтобетонов. Технологии приготовления теплых АБС позволяют улучшить условия труда рабочих; снизить скорость старения битума; увеличить дальность возки, количество вносимого в смесь переработанного асфальтобетона; расширить сезон дорожных работ; сократить количество вредных выбросов и потребление энергии на этапе производства [2, 3].

Для производства АБС с низкими температурами смешивания и уплотнения используют три основных технологии: введение в состав поверхностно-активных добавок, вспенивание битума водой, а также введение органических добавок — восков. Данные технологии дают возможность за счет более низкой вязкости битумного связующего или уменьшения трения между компонентами битума и минеральным материалом обеспечить однородность и требуемую подвижность АБС при пониженной температуре. Но снижение вязкости битума может стать причиной ухудшения показателей прочности асфальтобетона, что негативно отразится на сроке службы дорожного полотна [4]. При подборе состава теплой АБС важна оценка ее эксплуатационных свойств и расчет срока службы дорожного покрытия.

На срок эксплуатации асфальтобетонного покрытия оказывают влияние множество факторов. Это

статические и динамические нагрузки, вызываемые воздействием транспортных средств, влияние повышенных и пониженных температур, атмосферных осадков [5]. Таким образом, долговечность асфальтобетона будут характеризовать такие его эксплуатационные свойства, как водостойкость, сдвигоустойчивость, устойчивость к пластическим деформациям (колесообразованию). Поиску способов повышения устойчивости асфальтобетона к пластическим деформациям уделяют большое внимание как отечественные [6–8], так и зарубежные исследователи [9–11].

Одним из способов получения теплых асфальтобетонов служит использование органических добавок — восков [2, 12]. Технология применения восков в качестве температуропонижающих добавок для асфальтобетона получила широкое распространение за рубежом [13–16]. Ключевые преимущества применения таких добавок — повышение устойчивости вяжущего к старению, сопротивляемости дорожного покрытия пластическим деформациям, улучшение адгезии вяжущего к минеральному заполнителю и водостойкости асфальтобетона [17]. Но, в отличие от поверхностно-активных добавок, воски могут ухудшить устойчивость к низким температурам, понизить трещиностойкость асфальтобетона [10]. В этом случае перспективной альтернативой могут стать многофункциональные модификаторы, включающие в себя как воски, так и компоненты, позволяющие нивелировать недостатки органических добавок.

Таким модификатором является Вискодор ПВ-2. Эта присадка, разработанная компанией ООО «Селена» в сотрудничестве с кафедрой автомобильных и железных дорог имени А.М. Гридчина БГТУ имени В.Г. Шухова, представляет собой комплекс, состоящий из восковых компонентов, катионных поверхностно-активных веществ (ПАВ) и пластификаторов. Выполненные ранее исследования [18]

показали, что указанная добавка повышает температурный интервал пластичности и адгезионные свойства. Ее применение может быть перспективным для улучшения эксплуатационных свойств и долговечности асфальтобетона.

Цель исследования — оценка эффективности влияния Вискодор ПВ-2 на физические и эксплуатационные свойства и, как следствие, на долговечность асфальтобетона.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для сравнительной оценки эффективности комплексной добавки Вискодор ПВ-2 в работе использована широко известная органическая добавка на основе амидного воска Licomont BS-100 (производство Clariant, Швейцария). Согласно литературным данным [2, 19], применение 2,0–3,0 % указанной добавки в составе битумных вяжущих позволяет значительно увеличить интервал пластичности вяжущего.

Были протестированы образцы АБС типа А16Вн в соответствии с ГОСТ Р 58406.2–2020 на основе исходного битума без добавок и на вяжущем, модифицированном исследуемыми восковыми добавками.

В качестве исходного вяжущего использован битум БНД 70/100, соответствующий по всем показателям нормам ГОСТ 33133. В качестве минеральных компонентов смеси применили гранитный щебень фракции (фр.) 8–16 и 4–8 мм и песок дробленый фр. 0–4 мм, а также минеральный порошок МП-2.

Исходя из гранулометрических составов вышеуказанных минеральных материалов, по методике, изложенной в ГОСТ Р 58406.10–2020, был подобран

оптимальный состав минеральной части асфальтобетонной смеси А16Вн в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58406.2–2020, а также определено рациональное содержание битумного вяжущего.

Приготовление контрольной смеси на основе исходного битума без добавок осуществлялось при  $t = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а смесей с температуропонижающими органическими добавками Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 — при температуре  $t = 135\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Подготовка и уплотнение образцов АБС производились согласно ГОСТ Р 58406.9–2019. Уплотнение контрольной горячей АБС на битуме без добавок проводили при  $t = 135\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а теплых АБС с исследуемыми добавками при  $t = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$  в сборной форме для уплотнения посредством 50 ударов уплотнительного молота. Далее определяли следующие физические и эксплуатационные свойства АБС: максимальную плотность — по ГОСТ Р 58401.16, объемную плотность — по ГОСТ Р 58401.10, содержание пустот в минеральном заполнителе (ПМЗ) — по ГОСТ 58406.10, содержание пустот, наполненных битумным вяжущим (ПНВ), — по ГОСТ 58406.10, коэффициент водостойкости — по ГОСТ Р 58401.18, разрушающую нагрузку и деформацию по методу Маршалла по ГОСТ 58406.8, среднюю глубину колеи и угол наклона колееобразования — по ГОСТ Р 58406.3.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гранулометрические характеристики и подобранный рациональный состав минеральной части представлены в табл. 1.

Табл. 1. Подбор гранулометрического состава минеральной части

Table 1. Selection of granulometric composition of the mineral part

Номер Number	Наименование материала Name of material	Содержание, % Content, %	Содержание зерен менее данного размера (мм), в % по массе Content of grains less than this size (mm), in % by weight						
			22,4	16	8	4	2	0,5	0,063
1	Щебень фр. 8–16 мм Crushed stone fraction 8–16 mm	35	35,0	33,1	8,2	0,4	0,0	0,0	0,0
2	Щебень фр. 4–8 мм Crushed stone fraction 4–8 mm	25,6	25,6	25,6	25,0	6,3	0,8	0,0	0,0
3	Песок дробленый фр. 0–4 мм Crushed sand fraction 0–4 mm	33	33,0	33,0	33,0	32,2	23,5	9,9	1,6
4	Минеральный порошок Mineral powder	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	5,4
Зерновой состав минеральной части Grain composition of the mineral part			100,0	98,1	72,6	45,3	30,7	16,3	7,0
Требования ГОСТ Р 58406.2–2020 для смеси А16Вн Requirements of GOST R 58406.2–2020 for mixture А16Вн		Минимальное Min	90	70	37	25	7	5	5
		Максимальное Max	100	85	58	40	20	10	10

Табл. 2. Физические свойства исследуемых асфальтобетонных смесей

Table 2. Physical properties of investigated asphalt concrete mixtures

Показатель Indicator	Требования ГОСТ Р 58406.2–2020 Requirements of GOST R 58406.2–2020	Составы / Compositions			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Объемная плотность, г/см <sup>3</sup> Bulk density, g/cm <sup>3</sup>	Не нормируется Not standardized	2,384	2,380	2,370	2,375
Максимальная плотность, г/см <sup>3</sup> Maximum density, g/cm <sup>3</sup>	Не нормируется Not standardized	2,460	2,453	2,442	2,452
Содержание воздушных пустот, % Air void content, %	2,5–4,5	3,1	3,0	2,9	3,1
Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ), % Voids in mineral aggregate, %	≥12,0	14,2	14,2	14,6	14,5
Пустоты, наполненные битумным вяжущим (ПНБ), % Voids filled with bituminous binder, %	67,0–80,0	78,2	78,9	79,8	78,3

Оптимальное содержание битумного вяжущего составило 5 % сверх 100 % минеральной части.

В качестве битумного вяжущего для образцов асфальтобетонной смеси использовали:

- состав № 1 — битум БНД 70/100 без добавок;
- состав № 2 — с 1,5 % Вискодор ПВ-2;
- состав № 3 — с 2 % Вискодор ПВ-2;
- состав № 4 — с 2 % Licomont BS-100.

Результаты исследования физических свойств образцов асфальтобетонных смесей представлены в табл. 2.

Согласно полученным результатам (табл. 2), физические показатели всех испытуемых асфальтобетонных смесей соответствуют требованиям ГОСТ Р 58406.2–2020 для марки А16Вн. Это подтверждает, что зерновой состав асфальтобетонной смеси и количество вяжущего подобраны оптимально.

Показатели плотности исследуемых АБС отличаются друг от друга незначительно, что говорит об однородности составов. Содержание воздушных пустот, пустот в минеральном заполнителе, а также пустот, наполненных битумным вяжущим, в образцах АБС с добавками (составы № 2–4), не выше, чем в контрольном образце № 1 без добавок. Таким образом, применение добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 понизило температуру смешивания и укладки на 25 °С без ухудшения степени уплотнения смеси. Стоит отметить, что минимальным показателем содержания воздушных пустот и максимальным содержанием пустот, наполненных битумным вяжущим, обладает образец с битумным вяжущим, модифицированным 2 % Вискодор ПВ-2, что указывает на лучшее уплотнение смеси. Это объясняется наличием в добавке температуропонижающих катионных ПАВ и пластифицирующих компонентов.

При проектировании асфальтобетонного покрытия важнейшей задачей является оценка его долговечности. Долговечность асфальтобетона обусловлена его способностью сопротивляться воздей-

ствию нагрузок, перепадов температур, воды и другим факторам, оказывающим негативное влияние. К эксплуатационным показателям, которые позволяют оценивать долговечность, относятся водостойкость, устойчивость к образованию колеи, а также разрушающая нагрузка по Маршаллу и деформация по Маршаллу.

Результаты исследования эксплуатационных свойств в тестируемых образцах асфальтобетона представлены в табл. 3.

Полученные результаты показывают, что введение исследуемых добавок увеличивает коэффициент водостойкости, характеризующий устойчивость асфальтобетона к разрушающему воздействию воды. Наибольшее влияние на данный показатель оказала добавка Вискодор ПВ-2 в концентрации 2 % — коэффициент водостойкости составил 0,94 против 0,89 у асфальтобетона на исходном битуме без добавок. Это объясняется наличием в добавке пластификаторов и катионных ПАВ, способствующих увеличению адгезионных свойств вяжущего и наибольшему уплотнению АБС, что положительно отразится на долговечности дорожного полотна.

Разрушающая нагрузка и деформация по Маршаллу позволяют оценить устойчивость асфальтобетона к многократным нагрузкам. На рис. 1 показано изменение этих свойств при использовании в качестве основы битума, модифицированного исследуемыми добавками в сравнении с асфальтобетоном без добавок.

Исходя из результатов, представленных в табл. 3, можно заключить, что показатели разрушающей нагрузки по Маршаллу для всех образцов более чем в 2 раза превышают значения, требуемые по ГОСТ Р 58406.2–2020. Приведенная на рис. 1 диаграмма, показывает, что введение добавки Вискодор ПВ-2 в концентрации 2 % повышает этот показатель на 41,2 %, а 1,5 % — на 7,5 %, Licomont BS-100 — на 16,0 %. Такое увеличение будет способствовать повышению

Табл. 3. Эксплуатационные свойства образцов асфальтобетона

Table 3. Performance properties of asphalt concrete specimens

Наименование показателя Name of indicator	Требования ГОСТ Р 58406.2–2020 Requirements of GOST R 58406.2–2020	Составы / Compositions			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Коэффициент водостойкости Water resistance coefficient	≥ 0,85	0,89	0,90	0,94	0,91
Разрушающая нагрузка по Маршаллу, Н Destructive load by Marshall, N	≥ 5340	10 650	11 450	15 040	12 350
Деформация по Маршаллу, мм Marshall strain, mm	2,0–4,0	3,4	3,1	2,2	3,0
Средняя глубина колеи, мм Average track depth, mm	≤ 4,5	4,5	2,8	2,3	2,6
Угол наклона кривой колееобразования, мм/1000 циклов Rutting curve slope angle, mm/1,000 cycles	≤ 0,20	0,12	0,06	0,06	0,06

устойчивости асфальтобетона к образованию колеи, впадин и наплывов.

Деформация по Маршаллу для асфальтобетонов с добавками понижается в сравнении с образцом, приготовленным на исходном битуме. Так, данный показатель для асфальтобетона с 1,5 и 2 % Вискодор ПВ-2 снизился на 8,8 и 35,3 % соответственно, а с 2 % Licomont BS-100 — на 11,8 %, по сравнению с контрольным составом без добавок. Это свидетельствует о том, что применение исследуемых органических добавок повышает устойчивость асфальтобетона к остаточным деформациям.

Результаты исследования процесса колееобразования представлены в табл. 3 и на рис. 2.

На кривой колееобразования выделяют три зоны: стадия доуплотнения, при которой происходит ин-

тенсивное уплотнение до максимально возможного значения; стадия пластических деформаций, характеризующаяся сопротивляемостью асфальтобетона к образованию колеи; стадия разрушения, на этом этапе кривая колееобразования резко увеличивает наклон [20].

График колееобразования, полученный в результате испытаний (рис. 2), иллюстрирует характерные стадии доуплотнения (от 0 до 2000 проходов колеса) и развитие пластических деформаций (свыше 2000). Для всех испытанных образцов в результате 20 000 проходов колеса зоны разрушения достигнуто не было. Анализ полученных данных позволяет утверждать, что введение исследуемых органических добавок существенно повышает устойчивость асфальтобетона к воздействию пластических деформаций. Глубина колеи после 20 000

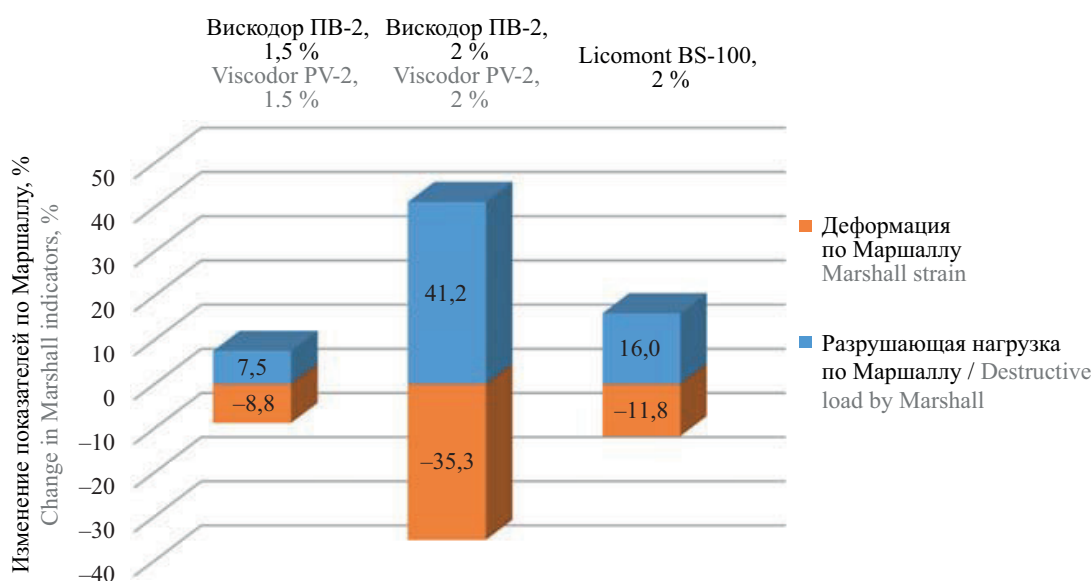


Рис. 1. Изменение разрушающей нагрузки и деформации по Маршаллу при использовании добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100

Fig. 1. Change in Marshall breaking load and Marshall strain when using Viscodor PV-2 and Licomont BS-100 additives

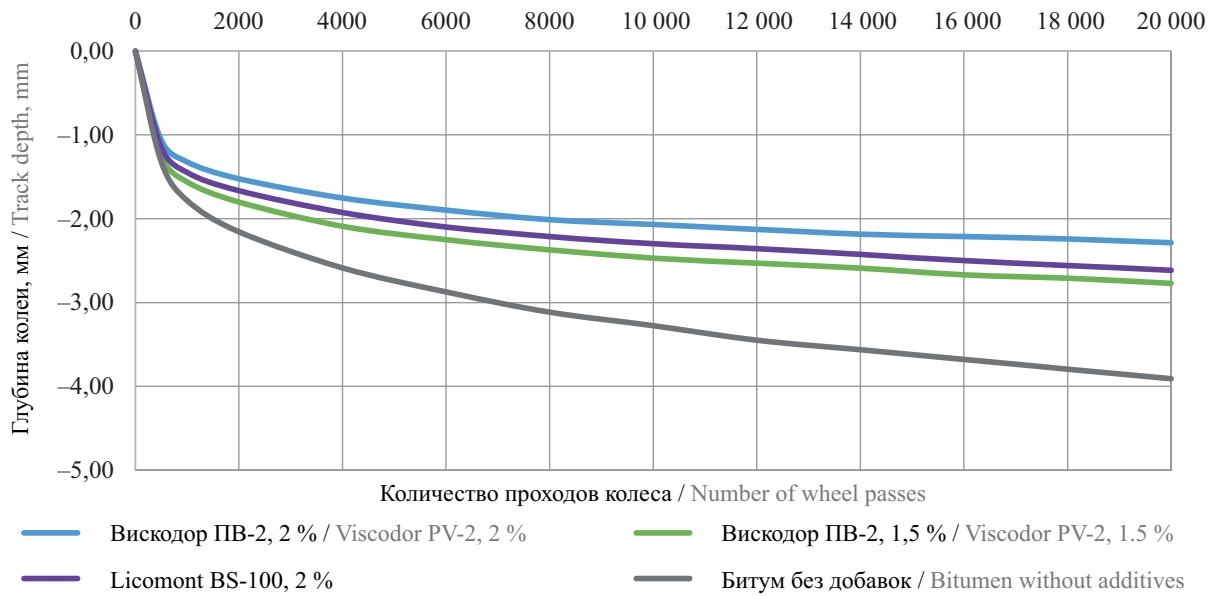


Рис. 2. График колееобразования образцов асфальтобетона А16Вн, приготовленных на исходном и модифицированном исследуемыми добавками битуме

Fig. 2. Rutting graph of A16Vn asphalt concrete specimens prepared on initial and bitumen modified with the investigated additives

проходов колеса на образцах с Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 значительно снизилась.

Наименьшая глубина колеи после 20 000 проходов выявлена на образцах асфальтобетона, модифицированного 2 % Вискодор ПВ-2 — 2,3 мм, в то время как для асфальтобетона без добавок этот показатель составил 3,9 мм; для образца с 2 % Licomont BS-100 — 2,6 мм (табл. 3). Угол наклона кривой колееобразования, характеризующий динамику развития пластических деформаций, для образцов с добавками также значительно снижается.

Так, этот показатель для асфальтобетона без добавок составляет 0,12 мм/1000 циклов, тогда как угол наклона для кривых колееобразования для образцов асфальтобетона с добавками составил 0,06 мм/1000 циклов. Следовательно, применение добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 повышает устойчивость асфальтобетона к пластическим деформациям и будет способствовать повышению долговечности асфальтобетона.

Наиболее высокие показатели устойчивости к колееобразованию образца асфальтобетона с приме-

Табл. 4. Расчет срока службы дорожного покрытия

Table 4. Calculation of road pavement service life

Показатель Indicator	Асфальтобетон на основе битумного вяжущего Asphalt concrete based on bituminous binder			
	Без добавки Without additive	1,5 % Вискодор ПВ-2 Viscodor PV-2	2 % Вискодор ПВ-2 Viscodor PV-2	2 % Licomont BS-100
Глубина колеи после минимального количества циклов прохода колеса Rut depth after minimum number of wheel pass cycles	2,6	2,1	1,8	1,9
Глубина колеи после максимального количества циклов прохода колеса Rut depth after maximum number of wheel pass cycles	3,9	2,8	2,3	2,6
Глубина колеи после одного цикла нагрузки Track depth after 1 load cycle	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$8,7 \cdot 10^{-8}$	$6,2 \cdot 10^{-8}$	$8,7 \cdot 10^{-8}$
Расчетный срок службы дорожного покрытия, лет Estimated service life of road pavement, years	4,9	7,7	10,9	7,8

нием 2 % Вискодор ПВ-2 объясняются его большим уплотнением при формировании вследствие наличия в добавке ПАВ и пластификаторов. В этом случае происходит меньшее доуплотнение асфальтобетона, чем в образцах с использованием исходного битума и вяжущего, модифицированного воском Licomont BS-100.

По критерию устойчивости к колееобразованию был рассчитан срок службы дорожного полотна по формуле, предложенной в методике БелдорНИИ<sup>1</sup>:

$$T_{\text{пласт}} = (K_{\text{усл}} \cdot H_{\text{кр}}) / (H_1 \cdot I_{\text{расч}} \cdot T_{50}),$$

где  $K_{\text{усл}}$  — коэффициент условий движения ( $K_{\text{усл}} = 1,3$ );  $H_{\text{кр}}$  — критическая глубина колеи, м (согласно ОДН 218.0.006–2002 для дорог с расчетной скоростью 100 и более км/ч составляет 0,02 м);  $H_1$  — глубина колеи после одного цикла воздействия колесной нагрузки, м;  $I_{\text{расч}}$  — интенсивность расчетной нагрузки, авт/ч ( $I_{\text{расч}} = 200$  авт/ч);  $T_{50}$  — сумма времени в году с температурой покрытия 50 °С и выше (при отсутствии заданных условий региона  $T_{50}$  принимают равным 190 ч/год).

Глубину колеи после одного цикла нагрузки определили по формуле:

$$H_1 = \frac{h_2 - h_1}{N_2 - N_1} 0,001,$$

где  $h_1$  — глубина колеи после минимального количества циклов прохода колеса;  $h_2$  — глубина колеи после максимального количества циклов прохода колеса;  $N_1$  — минимальное количество циклов прохода колеса, принимаемое в расчете (равно 2000);  $N_2$  — максимальное количество циклов прохода колеса, принимаемое в расчете (равно 10 000).

Результаты расчета срока службы дорожного покрытия на основе испытываемых образцов асфальтобетона представлены в табл. 4.

Исходя из полученных результатов можно констатировать, что применение исследуемых органи-

ческих добавок позволяет значительно повысить долговечность дорожного покрытия. Так, использование 1,5 и 2 % Вискодор ПВ-2 в составе вяжущего повышает срок службы дорожного покрытия в 1,6 и 2,2 раза соответственно, а 2 % Licomont BS-100 — в 1,6 раза.

Согласно ОДМ 218.6.029–2017 рекомендованный гарантийный срок службы для верхнего слоя покрытия при прогнозируемой интенсивности движения 2500–5000 автомобилей в сутки должен быть не менее 6 лет. Таким образом, согласно полученным расчетам, испытанная в работе асфальтобетонная смесь без добавок не обеспечивает требуемый срок службы дорожного покрытия, что делает в данном случае применение добавок, повышающих устойчивость к колееобразованию, необходимым.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение модификаторов на основе синтетических восков Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 позволяет не только снизить температуры приготовления и укладки асфальтобетонной смеси А16Вн на 25 °С без ухудшения уплотняемости, но и улучшить эксплуатационные характеристики асфальтобетона, такие как водостойкость, разрушающая нагрузка и деформация по Маршаллу, устойчивость к колееобразованию.

Согласно расчетам по критерию устойчивости к пластическим деформациям, применение исследованных восковых добавок существенно повысит срок службы дорожного покрытия. Использование 1,5 и 2 % Вискодор ПВ-2 в составе вяжущего повышает срок службы дорожного покрытия в 2,7 и 3,8 раз соответственно, а 2 % Licomont BS-100 — в 2,7 раза.

Разработанная добавка Вискодор ПВ-2 не только не уступает, но и значительно превосходит по эффективности повышения эксплуатационных характеристик асфальтобетона известную импортную добавку Licomont BS-100. Применение отечественной добавки Вискодор ПВ-2 взамен импортной дает возможность снизить затраты на дорогостоящее импортное сырье и повысить срок службы дорожного покрытия.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Братчун В.И., Беспалов В.Л., Гуляк Д.В., Ромасюк Е.А., Пшеничных О.А. Комплексно-модифицированные дорожные асфальтобетоны повышенной долговечности // Агротехника и энергообеспечение. 2020. № 1 (26). С. 78–94. EDN LAIQMT.
2. Алшахван А., Калгин Ю.И. Обзор технологий приготовления теплых асфальтобетонных смесей // Молодой ученый. 2019. № 32 (270). С. 102–107. EDN GMJKRE.
3. Yadykina V.V., Akimov A.E., Trautvain A.I., Kholopov V.S. Influence of DAD-TA temperature-reduc-

ing additive on physical and mechanical properties of bitumen and compaction of asphalt concrete // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. P. 032006. DOI: 10.1088/1757-899X/327/3/032006

4. Калгин Ю.И., Алшахван А. Долговечность теплых асфальтобетонных смесей дорожных покрытий в климатических условиях Сирийской Арабской Республики // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 8 (752). С. 94–104. DOI: 10.32683/05-36-1052-2021-752-8-94-104. EDN XQCYVP.

<sup>1</sup> ДМД 02191.2.051–2012. Рекомендации по подбору составов асфальтобетонных смесей по асфальтовяжущему : введ. 01.03.2012. Минск : БелдорНИИ, 2012. 23 с.

5. Бузиков Ш.В., Лодыгина К.В. Долговечность асфальтобетона в дорожных покрытиях // Проблемы современной науки и образования. 2022. № 5 (174). С. 12–14. EDN HOATUX.
6. Саткоева А.М. Способы повышения долговечности дорожных щебеночно-мастичных асфальтобетонных комплексной модификацией структуры щебеночно-мастичных асфальтобетонов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2022. № 1 (153). С. 85–90. EDN GUSNHU.
7. Угланов Ю.А. Проблема колееобразования на дорогах с асфальтобетонным покрытием // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2022. № 1 (52). С. 39–42. EDN DDDTQI.
8. Жабцев А.В., Строкун А.С., Тюков Е.Б. Повышение устойчивости асфальтобетонного покрытия к образованию колеи на автодорожных мостах // Высокие технологии в строительном комплексе. 2022. № 2. С. 131–135. EDN DJLWTI.
9. Fonseca M., Capitão S., Almeida A., Picado-Santos L. Influence of Plastic Waste on the Workability and Mechanical Behaviour of Asphalt Concrete // Applied Sciences (Switzerland). 2022. Vol. 12. Issue 4. P. 2146. DOI: 10.3390/app12042146. EDN NJKMZH.
10. Hasan W.M., Yousif R.A., Hesami S., Tayh S.A., Jasim A.F., Ibrahim H.H. Evaluation of Mechanical Properties of Warm-Mix Asphalt Mixtures Prepared with Sasobit and Zeolite Additives // Journal of Engineering and Technological Sciences. 2024. Vol. 56. Issue 6. Pp. 716–726. DOI: 10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.6.4. EDN PFMVLA.
11. Azarhoosh A., Koohmishi M., Hamed G.H. Ruting Resistance of Hot Mix Asphalt Containing Coarse Recycled Concrete Aggregates Coated with Waste Plastic Bottles // Advances in Civil Engineering. 2021. Vol. 2021. Issue 1. DOI: 10.1155/2021/9558241. EDN XREMJA.
12. Шеховцова С.Ю., Высоцкая М.А., Холопов В.С. Особенности технологии теплого асфальтобетона // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 2. С. 43–48. DOI: 10.12737/24131. EDN XTVMNLN.
13. Zhang H., Zhang H., Ding H., Yang E., Qiu Y. Thermal stress calculation of wax-based warm mix asphalt considering thermorheologically complex behavior // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 368. P. 130488. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130488
14. Qiu Ya., Xie Q., Ding H., Xuan W. A novel method for determining the wax precipitation temperature in wax-based warm mix asphalt // International Journal of Pavement Engineering. 2023. Vol. 24. Issue 2. DOI: 10.1080/10298436.2023.2287143
15. Sigwarth T., Büchner J., Wistuba M.P. Bio-Degradable Wax to Modify Asphalt Binder for Warm Mix Asphalt // Sustainability. 2022. Vol. 14. Issue 16. P. 10219. DOI: 10.3390/su141610219
16. Tong B., Song X., Shen J., Jiang T., Chen J., Niu J. Effect of Sasobit warm mix on micro properties of asphalt with different degrees of regeneration // Frontiers in Materials. 2022. Vol. 9. DOI: 10.3389/fmats.2022.950550
17. Вдовин Е.А., Фомин А.Ю., Коновалов Н.В. Модифицирующая добавка на основе синтетического окисленного воска для щебеночно-мастичных асфальтобетонов // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2023. № 3 (3). С. 4–11. EDN GZDJYL.
18. Ядыкина В.В., Михайлова О.А. Влияние температуропонижающих добавок на основе синтетических восков на свойства битума // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. № 3. С. 8–18. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-8-18. EDN OFVUEB.
19. Пыриг Я.И., Галкин А.В. Сравнительная оценка влияния энергосберегающих добавок на свойства битума // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2020. № 90. С. 114–124. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.114. EDN SLZZXX.
20. Угланов Ю.А. Исследование колеейности и определение риска возникновения ДТП на дорогах, подверженных образованию колеи // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2022. № 1 (52). С. 33–39. EDN BVEEGW.

Поступила в редакцию 6 июня 2025 г.

Принята в доработанном виде 12 января 2026 г.

Одобрена для публикации 12 января 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ольга Анатольевна Михайлова** — аспирант кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; SPIN-код: 1581-1030, РИНЦ ID: 1255044, ORCID: 0009-0000-5896-5524; mihaylovalymar@mail.ru;

**Валентина Васильевна Ядыкина** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)**; 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; SPIN-код: 2468-5657, РИНЦ ID: 111245, Scopus: 6507406311, ResearcherID: P-9876-2015, ORCID: 0000-0001-8289-2361; vvyua@intbel.ru;

**Андрей Евгеньевич Акимов** — кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог им. А.М. Гридчина; **Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**

(БГТУ им. В.Г. Шухова); 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; SPIN-код: 8570-2378, РИНЦ ID: 878375, Scopus: 57201780981, ResearcherID: P-7075-2017, ORCID: 0000-0001-8556-5331; akimov548@gmail.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Bratchun V.I., Bespalov V.L., Gulyak D.V., Romasyuk E.A., Pshenichnyh O.A. Complex-modified road asphalt-concrete enhanced durability. *Agrotechnics and Energy Supply*. 2020; 1(26):78-94. EDN LAIQMT. (rus.).
2. Alshahvan A., Kalgin Y.I. Review of technologies for the preparation of warm asphalt concrete mixtures. *Young Scientist*. 2019; 32(270):102-107. EDN GMJKRE. (rus.).
3. Yadykina V.V., Akimov A.E., Trautvain A.I., Kholopov V.S. Influence of DAD-TA temperature-reducing additive on physical and mechanical properties of bitumen and compaction of asphalt concrete. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2018; 327:032006. DOI: 10.1088/1757-899X/327/3/032006
4. Kalgin Yu.I., Alshahwan A. Durability of warm mix asphalt in asphalt surfaces in climatic conditions of the Syrian Arab Republic. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2021; 8(752):94-104. DOI: 10.32683/05-36-1052-2021-752-8-94-104. EDN XQCYVP. (rus.).
5. Buzikov Sh.V., Lodygina K.V. Durability of asphalt concrete in road surfaces. *Problems of Modern Science and Education*. 2022; 5(174):12-14. EDN HOATUX. (rus.).
6. Satkoeva A. Methods for increasing the durability of road crushed stonemastic asphalt concrete by complex modification of the structure of crushed stonemastic asphalt concrete. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2022; 1(153):85-90. EDN GUSNHY. (rus.).
7. Uglanov Yu.A. The problem of rutting on roads with asphalt concrete pavement. *Technical Regulation in Transport Construction*. 2022; 1(52):39-42. EDN DDDTQI. (rus.).
8. Zhabtsev A.V., Strokin A.S., Tyukov Ye.B. Improving the stability of asphalt concrete pavement to the formation of a track on road bridges. *High Technologies in the Construction Complex*. 2022; 2:131-135. EDN DJLWTI. (rus.).
9. Fonseca M., Capitão S., Almeida A., Picado-Santos L. Influence of Plastic Waste on the Workability and Mechanical Behaviour of Asphalt Concrete. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022; 12(4):2146. DOI: 10.3390/app12042146. EDN NJKMZH.
10. Hasan W.M., Yousif R.A., Hesami S., Tayh S.A., Jasim A.F., Ibrahim H.H. Evaluation of Mechanical Properties of Warm-Mix Asphalt Mixtures Prepared with Sasobit and Zeolite Additives. *Journal of Engineering and Technological Sciences*. 2024; 56(6):716-726. DOI: 10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.6.4. EDN PFMVLA.
11. Azarhoosh A., Koohmishi M., Hamed G.H. Rutting Resistance of Hot Mix Asphalt Containing Coarse Recycled Concrete Aggregates Coated with Waste Plastic Bottles. *Advances in Civil Engineering*. 2021; 2021(1). DOI: 10.1155/2021/9558241. EDN XREMJA.
12. Shekhovtsova S.Yu., Vysotskaya M.A., Kholopov V.S. Features of warm asphalt concrete technology. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017; 2:43-48. DOI: 10.12737/24131. EDN XTBMLN. (rus.).
13. Zhang H., Zhang H., Ding H., Yang E., Qiu Y. Thermal stress calculation of wax-based warm mix asphalt considering thermorheologically complex behavior. *Construction and Building Materials*. 2023; 368:130488. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130488
14. Qiu Ya., Xie Q., Ding H., Xuan W. A novel method for determining the wax precipitation temperature in wax-based warm mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023; 24(2). DOI: 10.1080/10298436.2023.2287143
15. Sigwarth T., Büchner J., Wistuba M.P. Bio-Degradable Wax to Modify Asphalt Binder for Warm Mix Asphalt. *Sustainability*. 2022; 14(16):10219. DOI: 10.3390/su141610219
16. Tong B., Song X., Shen J., Jiang T., Chen J., Niu J. Effect of Sasobit warm mix on micro properties of asphalt with different degrees of regeneration. *Frontiers in Materials*. 2022; 9. DOI: 10.3389/fmats.2022.950550
17. Vdovin E.A., Fomin A.Y., Konovalov N.V. Modifying additive based on synthetic oxidized wax for crushed stone-mastic asphalt concretes. *Automobile Roads and Transport Infrastructure*. 2023; 3(3):4-11. EDN GZDJYL. (rus.).
18. Yadykina V., Mihaylova O. The effect of temperature-reducing additives based on synthetic waxes on the properties of bitumen. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2023; 3:8-18. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-3-8-18. EDN OFVUEB. (rus.).
19. Pyrig Ya.I., Galkin A.V. Comparison evaluation of the effect of energy-saving additives on bitumen properties. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2020; 90:114-124. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.90.0.114. EDN SLZZXX. (rus.).
20. Uglanov Yu.A. Investigation of trackage and determination of the risk of accidents on roads subject to the formation of a track. *Technical Regulation in Transport Construction*. 2022; 1(52):33-39. EDN BVEEGW. (rus.).

Received June 6, 2025.

Adopted in revised form on January 12, 2026.

Approved for publication on January 12, 2026.

**B I O N O T E S :** **Ol'ga A. Mihailova** — postgraduate student of the Department of Automobiles and Railways named after A.M. Gridchin; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; SPIN-code: 1581-1030, ID RSCI: 1255044, ORCID: 0009-0000-5896-5524; mihaylovalymar@mail.ru;

**Valentina V. Yadykina** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automobiles and Railways named after A.M. Gridchin; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; SPIN-code: 2468-5657, ID RSCI: 111245, Scopus: 6507406311, ResearcherID: P-9876-2015, ORCID: 0000-0001-8289-2361; vvya@intbel.ru;

**Andrej E. Akimov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobiles and Railways named after A.M. Gridchin; **Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)**; 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russian Federation; SPIN-code: 8570-2378, ID RSCI: 878375, Scopus: 57201780981, ResearcherID: P-7075-2017, ORCID: 0000-0001-8556-5331; akimov548@gmail.com.

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

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 691.32:691.542

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.399-410

## Влияние полого и плотного заполнителя на реологию самоуплотняющихся бетонных смесей

**Сергей Дмитриевич Епихин, Александр Сергеевич Иноземцев***Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Строительство нуждается в новых бетонах. Популярность набирают самоуплотняющиеся бетоны (СУБ). Преимуществом СУБ является высокая подвижность, поэтому акцент ставится на их реологических свойствах. Развитие технологии продолжается в легких самоуплотняющихся бетонах (ЛСУБ), сочетающих высокую подвижность и низкую плотность. Изучение ЛСУБ акцентируется на влиянии рецептуры на свойства смеси. Цель исследования — изучение влияния соотношения сухих компонентов на реологические свойства ЛСУБ на полых микросферах.

**Материалы и методы.** Объектом исследования приняты ЛСУБ на полых микросферах. Соотношение сухих компонентов менялось в зависимости от целевой плотности бетона. Состав включает: портландцемент, керамические микросферы, кремнеземистую добавку, фракционный песок ( $P_f$ ), кварцевую муку ( $P_m$ ), гиперпластификатор и воду. Количество воды и концентрация пластификатора приняты постоянными: 0,5 и 1,4 % соответственно. Получены результаты исследований реологических характеристик ЛСУБ. Ключевые реологические параметры — напряжение сдвига и вязкость.

**Результаты.** Бетонные смеси плотностью 1400 кг/м<sup>3</sup> имеют дилатантный характер течения вне зависимости от соотношения  $P_m/P_f$ . При плотности 1500 и 1600 кг/м<sup>3</sup> характер течения сменяется на псевдопластичный при  $P_m/P_f = 25/75$ . Показана возможность управления типом течения тяжелых бетонов изменением  $P_m/P_f$ . Разница течения между легкими и тяжелыми бетонными смесями отражается на зависимостях напряжения сдвига и вязкости от  $P_m/P_f$ . Увеличение  $P_m$  повышает напряжения сдвига и вязкость у ЛСУБ, у тяжелых составов наблюдается смена нисходящей зависимости на восходящую в диапазоне  $P_m/P_f = 25/75–75/25$  при разных скоростях сдвига.

**Выводы.** Представлена возможность изменения реологического характера течения легких и тяжелых смесей при изменении исследуемых факторов. Выполнен сравнительный анализ реологических кривых с использованием уравнения Оствальда – Вейля для тяжелых и легких бетонных смесей. Рассмотрена роль дисперсности минерального заполнителя и полых микросфер в управлении реологическими свойствами исследуемых ЛСУБ.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** самоуплотняющиеся бетонные смеси, полый заполнитель, мелкозернистый бетон, реология, напряжение сдвига, вязкость, уравнение Оствальда – Вейля, псевдопластическое течение, дилатантные течения

*Финансирование и благодарности.* Данная работа выполняется в рамках реализации Программы развития федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» на 2025–2036 годы. Работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Влияние полого и плотного заполнителя на реологию самоуплотняющихся бетонных смесей // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 3. С. 399–410. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.399-410

*Автор, ответственный за переписку:* Сергей Дмитриевич Епихин, epikhinsd@mgsu.ru.

## The effect of hollow and dense aggregates on the rheology of self-compacting concrete

**Sergey D. Epikhin, Aleksandr S. Inozemtcev***Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** Construction needs new concrete. Self-compacting concretes (SCC) are gaining popularity. The advantage of SCC is high mobility, so the emphasis is on their rheological properties. The technology continues to develop in lightweight self-compacting concretes, that combines high mobility and low density. The study of LWSCC (Light-weight self-compacting concrete) focuses on the effect of the formulation on the properties of the mixture. The purpose of this study is to investigate the effect of the ratio of dry components on the rheological properties of LWSCC on hollow microspheres.

**Materials and methods.** The object of the study is LWSCC on hollow microspheres. The ratio of dry components varied depending on the target concrete density. The composition includes: Portland cement, ceramic hollow microspheres, silica additive, fractional sand ( $S_s$ ), quartz powder ( $S_p$ ), hyperplasticizer and water. The amount of water and the concentration

of plasticizer are assumed to be constant: 0.5 and 1.4 %, respectively. The results of studies of the rheological characteristics of LWSCC were obtained. The key rheological parameters are shear stress and viscosity.

**Results.** Concrete mixtures with a density of 1,400 kg/m<sup>3</sup> have a dilatant flow pattern regardless of the  $S_p/S_f$  ratio. At densities of 1,500 and 1,600 kg/m<sup>3</sup>, the flow pattern changes to pseudoplastic at  $S_p/S_f = 25/75$ . The possibility of controlling the type of flow of heavy concrete by changing the  $S_p/S_f$  is shown. The difference in flow between lightweight and heavy concrete mixtures is reflected in the dependences of shear stress and viscosity on  $S_p/S_f$ . An increase in  $S_p$  increases the shear stresses and viscosity of LWSCC, for heavy compositions, a downward-to-upward relationship is observed in the range of  $S_p/S_f = 25/75-75/25$  at different shear rates.

**Conclusions.** The possibility of changing the rheological character of the flow of lightweight and heavy mixtures with changes in the studied factors is shown. A comparative analysis of rheological curves using the Ostwald – Weil equation for heavy and light concrete mixtures has been performed. The role of the dispersion of mineral aggregate and hollow microspheres in controlling the rheological properties of the studied LWSCC is considered.

**KEYWORDS:** lightweight self-compacting concrete, hollow aggregates, fine-grained concrete, rheology, shear stresses, viscosity, rheology, Ostwald – Weil equation, pseudoplastic flow, dilatant flow

*Funding and Acknowledgements.* This work is carried out as part of the development program of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research Moscow State University of Civil Engineering” for 2025–2036. The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. FSWG-2026-0003.

**FOR CITATION:** Epikhin S.D., Inozemtcev A.S. The effect of hollow and dense aggregates on the rheology of self-compacting concrete. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(3):399-410. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.399-410 (rus.).

*Corresponding author:* Sergey D. Epikhin, epikhinsd@mgsu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день мало найдется объектов строительства, где не использовался бы бетон [1]. Бетон — один из основных материалов современного строительства. Это обосновывает интерес ученых к исследованиям по усовершенствованию бетонов [2, 3]. Одним из приоритетных направлений фундаментальных и поисковых научных исследований в строительных науках является развитие теоретических и прикладных основ для получения новых легких, высокопрочных, долговечных бетонов. Поэтому совершенствование технологии самоуплотняющихся бетонов (СУБ) приобретает особую актуальность [4–6]. Такой бетон способен равномерно заполнять пространство опалубки без дополнительного уплотнения, что обусловлено высокой текучестью при обязательном сохранении целостности (однородности) структуры в состоянии покоя [7, 8].

Первый опыт массового применения технологии СУБ в России связан с непрерывным бетонированием нижней зоны фундаментной плиты под башню «А» комплекса «Федерация» ММДЦ «Москва-Сити» [9]. Еще один пример использования таких бетонов — бетонирование крупнейшей на территории Беларуси фундаментной плиты (объем бетона около 9100 м<sup>3</sup>) высотного здания на объекте «Газпром Центр» (строительство многофункционального комплекса в г. Минске на границах ул. Филимонова – просп. Независимости – ул. Макаенка [10]).

Востребованность СУБ объясняется высокой подвижностью, что обуславливает направление исследований, посвященных реологическим характеристикам, моделям и т.д. Мировой опыт в настоящее время описывает основные рецептурные факторы, способствующие получению и модифицированию СУБ [11, 12]. В публикациях [13, 14] представлен

критический обзор работ, посвященных реологии бетонной смеси. Авторами установлено влияние отдельных компонентов смеси на реологические свойства, включая: портландцемент [15], минеральные добавки (зола-унос, молотый доменный шлак и диоксид кремния) [16], крупные и мелкодисперсные заполнители, а также химические добавки (суперпластификатор, модификатор вязкости и воздухововлекающий агент). На реологию бетонной смеси существенное влияние оказывают следующие свойства минеральных добавок [17]: тип, химический состав, объемное содержание в смеси, плотность упаковки в бетоне [18], крупность частиц [19], гранулометрический состав. Наиболее важными показателями, описывающими реологические свойства бетонных смесей, являются предел текучести при сдвиге  $\tau_0$  и пластическая вязкость  $\mu$ . Так, в труде [20] рассматривается влияние пористости на реологические свойства СУБ, а именно пластическую вязкость и предел текучести, полученные с помощью ротационного реометра Brookfield при заданном напряжении сдвига и скорости сдвига. Результаты экспериментов показали, что значения пластической вязкости и предела текучести снижаются с увеличением процентного содержания воздухововлекающей добавки. Данное снижение в основном объясняется наличием пузырьков воздуха, которые упрощают течение смеси. Установлено, что внутреннее трение между частицами песка и цемента сокращается из-за наличия пустот между ними, что служит причиной снижения предела текучести. По тому же принципу образование пустот способствует уменьшению сцепления цементного теста и, следовательно, снижению пластической вязкости смеси.

Развитие технологии конструкционных легких бетонов привело к потребности получения самоуплотняющихся его видов [21, 22]. Легкий самоуплот-

няющийся бетон (ЛСУБ) позволяет объединить такие полезные качества, как низкая плотность и высокая степень подвижности бетонной смеси. Особое внимание для таких бетонов необходимо уделять особенностям рецептуры для получения бетонной смеси с заданными свойствами [23–25]. В работе [26] рассматривается замена природных плотных заполнителей на крошку из переработанных автомобильных шин и на легкий шлаковый заполнитель с добавлением фибры. Показано, что увеличение объемного содержания армирующего компонента негативно влияет на удобоукладываемость смеси. При этом волокна, имеющие длину больше, чем минимальное расстояние между стержнями арматуры в свету, смоделированное в ходе стандартного испытания с J-образным кольцом, не проходят через него и накапливаются внутри испытательного устройства, что ограничивает применение такого решения в промышленных условиях, особенно в густоармированных конструкциях. Определено синергетическое действие ускорителей твердения (сульфоалюминатный цемент, хлорид кальция) и разной фибры (волокна из поливинилового спирта (ПВС) и целлюлозные нановолокна (ЦНВ)) на реологические свойства пенополистиролбетона [27]. В ходе испытаний, выполненных с помощью реометра Viskomat XL, установлено, что путем изменения количества волокон ПВС можно регулировать предел текучести, пластическую вязкость и тиксотропию сверхлегкого пенополистирольного бетона. Добавление ускорителя твердения дает возможность значительно снизить предел текучести и увеличить пластическую вязкость бетонного раствора. При этом совместное использование волокон ПВС и ускорителя твердения позволяет достигнуть эффекта, когда наблюдается увеличение предела текучести и снижение пластической вязкости суспензии.

Таким образом, исследование реологии самоуплотняющихся легких бетонов соответствует актуальным направлениям развития строительного произ-

водства, а установление особенностей течения таких бетонных смесей в сравнении с самоуплотняющимся тяжелым мелкозернистым бетоном востребовано для расширения представлений о способах управления их структурой.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения влияния таких рецептурных факторов, как дисперсность плотного заполнителя и содержание легкого заполнителя объектом исследования выбраны легкие бетонные смеси на полых микросферах, включающие следующие компоненты [28–31]: минеральное вяжущее вещество; комплексную кремнеземистую добавку; керамические микросферы; фракционный песок фр. 0,16–0,63 мм; кварцевую муку, поликарбоксилатный пластификатор; воду.

Минеральное вяжущее вещество — бездобавочный портландцемент (Ц) ЦЕМ I 42,5 Н производства АО «Мальцевский портландцемент» (ГОСТ 31108), соответствующий по химическому и минералогическому составу, согласно табл. 1, и основным свойствам, согласно табл. 2.

Комплексная кремнеземистая добавка FremSilica 2 (МКМ) представляет собой мелкие шарообразные частицы аморфного кремнезема со средней удельной поверхностью 20 м<sup>2</sup>/г, соответствующие ТУ ВУ 190669631.001–2011. При этом средний размер составляет около 0,1 мкм<sup>1</sup>.

В качестве легкого заполнителя для снижения средней плотности бетона использовались полые керамические микросферы ForeSphere (МС) с диаметром частиц 10–500 мкм и основными характеристиками согласно табл. 3<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> FremSilica. URL: <http://www.frem-corp.ru/produktsiya/dobavki-v-beton/modifikatory/frem-silica/> full text

<sup>2</sup> ForeSphere. URL: <https://foresphere.com/catalog/alyumosilikatnye-mikrosfery/> full text

Табл. 1. Химический и минералогический состав клинкера

Table 1. Chemical and mineralogical composition of clinker

Оксиды / Oxides							Минералы / Minerals			
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
66,0	21,2	5,1	4,1	0,75	0,56	0,58	68,2	8,2	6,4	12,6

Табл. 2. Основные свойства используемого портландцемента

Table 2. The main properties of the Portland cement used

Показатель качества / Quality indicator	Значение / Values
Прочность на сжатие в возрасте 2 сут, МПа / Compressive strength. The hardening period is 2 days, MPa	22,9
Прочность на сжатие в возрасте 28 сут, МПа / Compressive strength. The hardening period is 28 days, MPa	52,6
Начало/конец схватывания, мин / Start/finish of setting, min	175/300
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг / Specific surface area, m <sup>2</sup> /kg	408
Нормальная густота цементного теста, % / Normal density of cement dough, %	24,3

Табл. 3. Свойства полых керамических микросфер ForeSphere

Table 3. Properties of hollow ceramic microspheres ForeSphere

Свойство / Property	Значение / Values
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup> / Bulk density, kg/m <sup>3</sup>	320–370
Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup> / True density, kg/m <sup>3</sup>	580–690
Средний размер частиц, мкм / Average particle size, microns	100
Толщина стенок микросферы, мкм / The thickness of the walls of the microsphere, microns	2–10
Плотность материала стенки, кг/м <sup>3</sup> / Wall material density, kg/m <sup>3</sup>	2500
Предел прочности на сжатие, МПа / Compressive strength, MPa	15,0–28,0
Твердость по шкале Мооса / Mohs scale hardness	5–6

Табл. 4. Расход компонентов исследуемых бетонных смесей

Table 4. Component consumption in the studied concrete mixtures

Составы Compositions	Объемное содержание, % / Volume content, %				
	ПЦ / PC	МКМ / MS	$\frac{\Pi_m + \Pi_\phi}{S_p + S_f}$	МС / MS	В + Пл W + PI
D1400	20,0	3,1	8,8	46,4	21,7
D1500			13,4	41,8	
D1600			18,2	37,0	
D2200			55,2	0	

Для управления технологическими свойствами исследуемых бетонных смесей использовался гиперпластификатор Melflux 2651F (Пл), поликарбоксилатный эфир второго поколения, не влияющий на схватывание цемента<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> АО EVROHIM-1 FUNKCIONALNIE DOBAVKI // EUROCHEM-1 FUNCTIONAL ADDITIVES JSC. URL: <https://www.eurohim.ru/catalog/dobavki-dlya-suhih-stroitelnyh-smesej/dobavki-dlya-suhih-stroitelnyh-smesej/superplastifikatory/melflux>. full text

Кварцевая мука ( $\Pi_m$ ) представляет собой тонкий песок, полученный путем помола фракционного кварцевого песка ( $\Pi_\phi$ ) в шаровой мельнице до  $S_{уд} = 720 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Соотношение сухих компонентов в составах варьировалось в зависимости от целевой плотности бетона путем изменения содержания полых микросфер (табл. 4). Для оценки влияния рецептурных факторов на технологические и реологические свойства бетонных смесей с разным содержанием полых микросфер

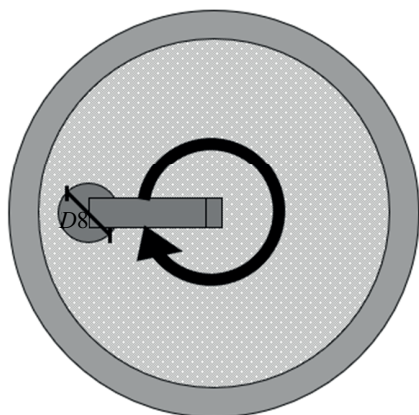
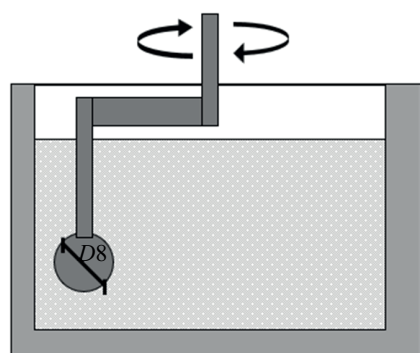
Табл. 5. Объемное содержание песка при различном соотношении  $\Pi_m/\Pi_\phi$ Table 5. The volume content of sand at a different ratio  $S_p/S_f$ 

$\frac{\Pi_m/\Pi_\phi}{S_p/S_f}$	Составы / Compositions							
	D2200		D1600		D1500		D1400	
	Компоненты / Components							
	$\Pi_m/S_p$	$\Pi_\phi/S_f$	$\Pi_m/S_p$	$\Pi_m/S_p$	$\Pi_m/S_p$	$\Pi_m/S_p$	$\Pi_m/S_p$	$\Pi_m/S_p$
0/100	0	55,2	0	18,2	0	13,4	0	8,8
25/75	13,8	41,4	4,55	13,65	3,35	10,05	2,2	6,6
50/50	27,6	27,6	9,1	9,1	6,7	6,7	4,4	4,4
75/25	41,4	13,8	13,65	4,55	10,05	3,35	6,6	2,2
100/0	55,2	0	18,2	0	13,4	0	8,8	0



Рис. 1. Автоматический растворосмеситель Automix

Fig. 1. Automatic mortar mixer Automix



a



b

Рис. 2. Определение вязкости и напряжения сдвига бетонной смеси на полых микросферах с помощью ротационного вискозиметра MCR 101: *a* — схема измерения; *b* — внешний видFig. 2. Determination of viscosity and shear stress of concrete mix on hollow microspheres by rotary viscometer MCR 101: *a* — measurement scheme; *b* — visual appearance

количество воды и концентрация пластификатора приняты постоянными  $В/Ц = 0,5$  и  $C_d = 1,4\%$ .

Изменение соотношения тонкой и фракционированной части (табл. 5) кварцевого песка позволяет установить вклад компонентов идентичного минерального состава в распределение воды в бетоне разной плотности.

Для приготовления бетонной смеси применялся автоматический растворосмеситель Automix<sup>4</sup> (рис. 1), реализующий программу перемешивания согласно ГОСТ 30744–2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка» п. 8.2.1 «Приготовление стандартного цементного раствора» с поэтапным варьированием скорости перемешивания при  $140 \pm 5$  об/мин и  $285 \pm 10$  об/мин.

Реологические свойства бетонной смеси оценивались по величине вязкости и напряжения сдвига бетонной смеси, полученной на ротационном вискозиметре MCR 101 (рис. 2) при орбитальном перемещении измерительной системы шар (диаметр 8 мм)

<sup>4</sup> GEO-CON. PRODUCTS PTY LTD. Testing Equipment for the Construction Industry. URL: <https://www.geo-con.com.au/product/fully-automatic-mortar-mixers-automix/>

с линейным приращением скорости сдвига до величины  $1 \text{ c}^{-1}$  в течение 60 с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с указанной выше методикой получены зависимости напряжения сдвига исследуемых бетонных смесей от скорости сдвига. Реологические кривые для бетонных смесей разной плотности с варьируемым соотношением  $\Pi_m/\Pi_\phi$  представлены на рис. 3.

По анализу графиков, представленных на рис. 3, снижение плотности бетонной смеси за счет увеличения доли легкого заполнителя приводит к увеличению напряжения сдвига, что указывает на ухудшение текучести. При этом составы легкобетонных смесей можно описать схожим характером течения (рис. 3, а–с) вне зависимости от соотношения тонкой и фракционированной составляющей кварцевого песка. Однако для смеси тяжелого бетона явно наблюдается изменение вида кривой при варьировании  $\Pi_m/\Pi_\phi$  (рис. 3, d).

Проанализируем реологическое поведение исследуемых бетонных смесей с использованием уравнения Оствальда – Вейля [30]:

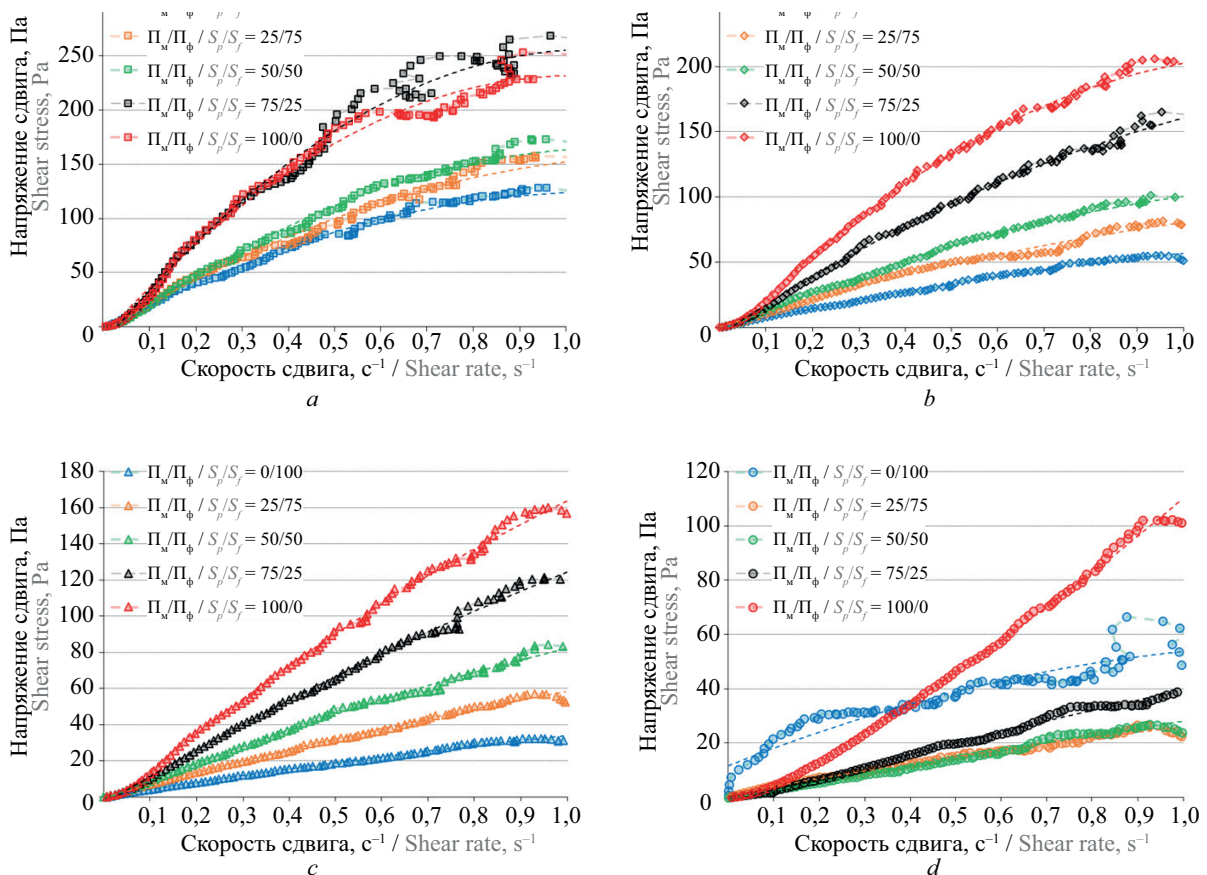
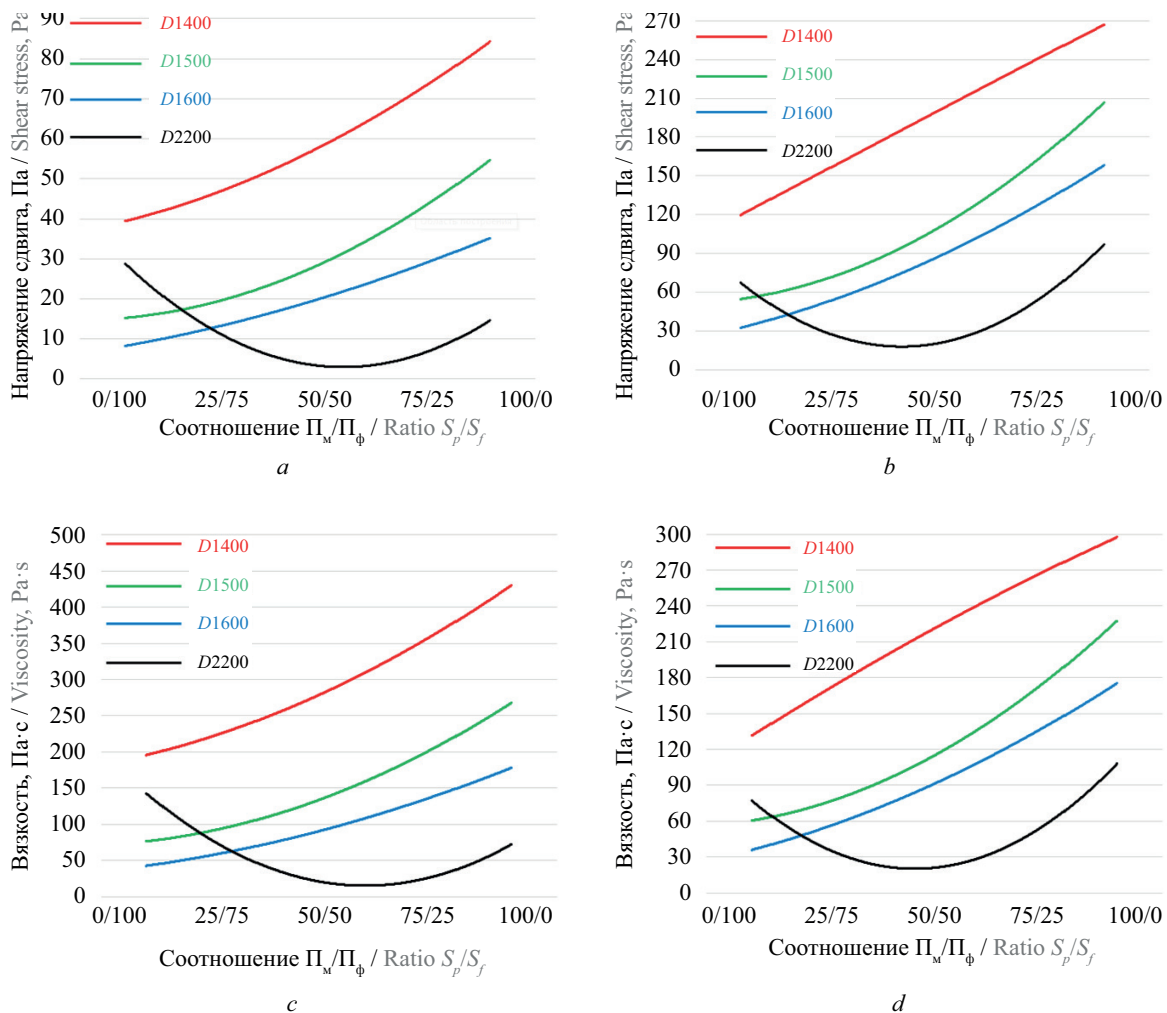


Рис. 3. Реологические кривые «напряжение сдвига – скорость сдвига» бетонных смесей: а — D1400; б — D1500; в — D1600; д — D2200

Fig. 3. Rheological curves “shear stress – shear rate” of concrete mixtures: а — D1,400; б — D1,500; в — D1,600; д — D2,200

**Табл. 6.** Коэффициенты уравнения Оствальда – Вейля, описывающие реологические кривые исследуемых бетонных смесей при варьировании  $\Pi_m/\Pi_\phi$ **Table 6.** Coefficients of the Ostwald – de Waele equation for the rheological flow curves of the studied concrete mixtures with varying  $S_p/S_f$  ratio

$\frac{\Pi_m}{\Pi_\phi}$ $\frac{S_p}{S_f}$	Составы / Compositions							
	D1400		D1500		D1600		D2200	
	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>n</i>
0/100	174,0	1,04	65,4	0,99	36,4	0,95	52,0	0,42
25/75	207,8	1,09	97,8	1,04	63,8	1,00	26,7	0,83
50/50	237,7	1,16	127,6	1,07	88,2	1,01	24,4	0,87
75/25	359,7	1,19	204,8	1,19	151,0	1,21	45,1	1,22
100/0	396,4	1,22	283,8	1,22	212,9	1,28	121,2	1,42

**Рис. 4.** Зависимость изменения реологических свойств от соотношения кварцевой муки и фракционированного песка тяжелых и легких бетонов при разных скоростях сдвига: *a* — напряжения сдвига при  $0,2 \text{ c}^{-1}$ ; *b* — напряжения сдвига при  $0,9 \text{ c}^{-1}$ ; *c* — вязкость при  $0,2 \text{ c}^{-1}$ ; *d* — вязкость при  $0,9 \text{ c}^{-1}$ **Fig. 4.** The dependence of the rheological features from ratio of quartz flour and fractionated sand in heavy and lightweight concretes at different shear rates: *a* — shear stress with  $0.2 \text{ s}^{-1}$ ; *b* — shear stress with  $0.9 \text{ s}^{-1}$ ; *c* — viscosity with  $0.2 \text{ s}^{-1}$ ; *d* — viscosity with  $0.9 \text{ s}^{-1}$

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n,$$

где  $\tau$  — напряжение сдвига;  $k$  — показатель консистенции;  $\dot{\gamma}$  — скорость сдвига;  $n$  — показатель, характеризующий тип течения ( $n < 1$  — псевдопластическое течение,  $n > 1$  — дилатантное течение).

Полученные параметры уравнений для каждого состава, описывающих реологические кривые, представлены в табл. 6.

Анализ табл. 6 показывает, что составы  $D1400$  вне зависимости от соотношения  $\Pi_m/\Pi_\phi$  имеют дилатантный характер течения смеси ( $n > 1$ ). Структура с таким типом течения представляет собой плотноупакованную дисперсную систему, где жидкая фаза, распределенная по поверхности твердых частиц, выступает в качестве смазки, уменьшающей трение между ними. При увеличении скорости сдвига в таких системах плотность упаковки частиц уменьшается, а жидкости становится недостаточно для скольжения трущихся друг об друга частиц. Это отражается в более интенсивном приращении напряжения сдвига, чем скорости сдвига.

В составах средней плотностью 1500 и 1600 кг/м<sup>3</sup> наблюдается смена типа течения с псевдопластического на дилатантный при  $\Pi_m/\Pi_\phi = 25/75$ . То есть при таком соотношении кварцевой муки и фракционированного песка структура представляет собой дисперсные системы, в которых твердые частицы имеют достаточное сцепление между собой, чтобы течение при увеличении скорости сдвига выполнялось агрегатами или звеньями. В таких системах вода может располагаться на поверхности частиц твердой фазы неравномерно по объему, а течение осуществляется слоями. На графиках рис. 3 это выражается меньшим приращением напряжения сдвига, чем скорости сдвига. Отметим, что коэффициент густоты  $k$  для составов  $D1500$  и  $D1600$  при увеличении  $\Pi_m/\Pi_\phi$  увеличивается. Данный показатель аналогичным образом зависит от содержания легкой фракции: чем больше полых микросфер (ниже плотность), больше коэффициент  $k$  или гуще бетонная смесь.

В табл. 6 видно, что соотношение  $\Pi_m/\Pi_\phi$  влияет на характер течения бетонной смеси, что отражается в изменении значения коэффициента  $n$ , где граничным диапазоном смены характера течения с псевдопластического на дилатантное является соотношение 50/50–75/25. Это указывает на описанное выше изменение положительного влияния кварцевой муки на трение между частицами заполнителя.

Из рис. 3 следует, что напряжение сдвига составов легкого бетона возрастает при увеличении доли кварцевой муки, а у составов тяжелого бетона меняется с не прямо пропорциональной зависимостью. Это отчетливо видно, если сравнить графики напряжения сдвига и вязкости при одинаковой скорости сдвига, которые представлены на рис. 4 для скорости сдвига, равной 0,2 и 0,9 с<sup>-1</sup>.

На рис. 4 видно, что увеличение доли кварцевой муки с соотношения 0/100 до 100/0 приводит к закономерному увеличению напряжения сдвига и вязкости для всех составов легкого бетона, что связано с повышением доли водопотребного компонента в системе. Аналогичное влияние наблюдается при увеличении доли полых микросфер: графики напряжения сдвига и вязкости с меньшей плотностью приведены выше. Однако для составов тяжелого бетона зависимость напряжения сдвига и вязкости от  $\Pi_m/\Pi_\phi$  описывается экстремальной зависимостью. Увеличение количества кварцевой муки в составе до значений  $\Pi_m/\Pi_\phi$  в границе 50/50–75/25 способствует снижению вязкости и напряжению сдвига. Это объясняется увеличением доли цементно-минерального теста, что приводит к увеличению расстояния между зернами песка. Дальнейшее насыщение бетонной смеси свыше указанного диапазона сопровождается увеличением исследуемых параметров. Подобная зависимость связана с преобразованием структуры тяжелой бетонной смеси.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, полученные результаты исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

- реологические кривые, описанные уравнением Оствальда – Вейля, показывают дилатантный характер течения бетонных смесей  $D1400$  вне зависимости от содержания  $\Pi_m/\Pi_\phi$ . Для  $D1500$  и  $D1600$  дилатантный характер течения сменяет псевдопластичный при  $\Pi_m/\Pi_\phi = 25/75$ . Показана возможность управления типом течения тяжелых бетонов  $D2200$  варьированием соотношения кварцевой муки и фракционированного песка;
- отличие в течение легких и тяжелых бетонных смесей отражается на зависимостях напряжения сдвига и вязкости от  $\Pi_m/\Pi_\phi$ . Для составов легкого бетона увеличение доли содержания кварцевой муки способствует увеличению напряжения сдвига и вязкости, а для тяжелого бетона наблюдается смена нисходящей зависимости на восходящую в диапазоне  $\Pi_m/\Pi_\phi = 25/75$ –75/25 при разных скоростях сдвига.

Полученные результаты исследований дополняют представления о влиянии рецептурных факторов на ключевые свойства самоуплотняющихся легких бетонов на полых микросферах [30, 31]. Помимо традиционных рецептурных факторов, важную роль в достижении требуемой текучести и однородности имеет соотношение минерального заполнителя разной дисперсности, отражающее вариативность дисперсности твердой фазы.

Перспективой развития темы является установление влияния факторов дисперсности плотного и объемного содержания полого заполнителя на показатели однородности бетонных смесей, а также на физико-механические свойства затвердевшего бетона.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Усова А.В. Современные бетоны в строительстве и их применение // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 74–4. С. 102–105. DOI: 10.18411/lj-06-2021-149. EDN HDJONR.
2. Рыльская К.А., Ничинский А.Н. Способы модификации свойств бетонной смеси и тяжелого бетона // Актуальные вопросы современной науки : сб. ст. по мат. XX Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 193–197. EDN НРХХМЖ.
3. Кравцов А.В., Цыбакин С.В. Опыт применения химических добавок пластифицирующего действия на основе поликарбоксилатов в бетонах // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. С. 50–55. EDN VZCXRL.
4. Соловьев А.К., Соловьев К.А., Стекольников Н.В. Самоуплотняющийся бетон в архитектурных конструкциях // Архитектура и современные информационные технологии. 2018. № 2 (43). С. 171–184. EDN UORRCZ.
5. Соргутов И.В., Иванов П.Ю., Крюкова О.В. Применение самоуплотняющихся бетонов в строительстве монолитных зданий и сооружений в РФ // Системные технологии. 2021. № 3 (40). С. 14–20. EDN MGMXHQ.
6. Мовсисян А.М. Влияние применения самоуплотняющегося бетона в монолитных конструкциях на эффективность возведения строительного объекта // Современные научные исследования и инновации. 2024. № 2 (154). EDN UKGYLK.
7. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С., Гридчин А.М., Фишер Х.Б. Композиционные вяжущие и самоуплотняющиеся фибробетоны для защитных сооружений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 7. С. 77–85. DOI: 10.12737/article\_5b4f02bf93df52.30110991. EDN XVLQJV.
8. Мозгалева К.М., Головнев С.Г. Самоуплотняющиеся бетоны: возможности применения и свойства // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2011. № 4. С. 55–60. EDN ONJNAZ.
9. Фаликман В.Р., Денискин В.В., Калашиников О.О., Сорокин В.Ю. Отечественный опыт производства и применения самоуплотняющегося бетона // Национальная ассоциация ученых. 2015. № 2–3 (7). С. 68–73. EDN YMGQDD.
10. Батяновский Э.И., Бондарович А.И., Калиновская Н.Н., Рябчиков П.В. Самоуплотняющийся бетон и технология бетонирования фундаментного массива с использованием 9000 кубических метров бетона // Наука и техника. 2021. Т. 20. № 4. С. 329–337. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-4-329-337. EDN RIPRJM.
11. Mandal R., Panda S.K., Nayak S. Evaluation of the rheological properties of self-compacting recycled aggregate concrete // Materials Today: Proceedings. 2023. Vol. 93. Pp. 170–175. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.114
12. Ерофеев В.Т., Санягина Я.А., Ерофеева И.В., Максимова И.Н. Подбор составов декоративно-отделочных порошково-активированных бетонов с зернистой фактурой поверхности по реологическим свойствам // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 3 (52). С. 16–31. DOI: 10.54734/20722958\_2022\_3\_16. EDN OVYJCE.
13. Jiao D., Shi C., Yuan Q., An X., Liu Y., Li H. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete : a review // Cement and Concrete Composites. 2017. Vol. 83. Pp. 146–159. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016
14. Mandal R., Panda S.K., Nayak S. Rheology of Concrete: Critical Review, recent Advancements, and future prospectives // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 392. P. 132007. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132007
15. Kaufmann J., Winnefeld F., Hesselbarth D. Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes // Cement and Concrete Composites. 2004. Vol. 26. Issue 5. Pp. 541–549. DOI: 10.1016/S0958-9465(03)00070-2
16. Zhang X., Han J. The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30. Issue 5. Pp. 827–830. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00236-2
17. Lee S.H., Kim H.J., Sakai E., Daimon M. Effect of particle size distribution of fly ash–cement system on the fluidity of cement pastes // Cement and Concrete Research. 2003. Vol. 33. Issue 5. Pp. 763–768. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)01054-2
18. Chen J.J., Kwan A.K.H. Superfine cement for improving packing density, rheology and strength of cement paste // Cement and Concrete Composites. 2012. Vol. 34. Issue 1. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.006
19. Li T., Liu J. Effect of aggregate size on the yield stress of mortar // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 305. P. 124739. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124739
20. Benaicha M., Jalbaud O., Alaoui A.H., Burtshell Y. Porosity effects on rheological and mechanical behavior of self-compacting concrete // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 48. P. 103964. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103964
21. Adhikary S.K., Ashish D.K., Sharma H., Patel J., Rudzionis Z., Al-Ajamee M. et al. Lightweight self-compacting concrete : a review // Resources, Conservation & Recycling Advances. 2022. Vol. 15. P. 200107. DOI: 10.1016/j.rcradv.2022.200107
22. Kumar P., Pasla D., Saravanan T.J. Self-compacting lightweight aggregate concrete and its proper-

ties : a review // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 375. P. 130861. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130861

23. Kumar P., Dinakar P., Saravanan T.J. Development and performance analysis of structural lightweight aggregate self-compacting concrete: A sustainable solution // *Process Safety and Environmental Protection*. 2025. Vol. 197. P. 107052. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107052

24. Kuttagola I., Prashanth M.H. Development and performance evaluation of self-compacting lightweight alkali-activated concrete incorporating hydrotron clay balls // *Structures*. 2025. Vol. 71. P. 108124. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.108124

25. Palacio A.J., Raggiotti B.B., Rougier V.C. Development and experimental verification of a design method for steel fibre-reinforced high strength lightweight self-compacting concrete // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 453. P. 139012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139012

26. Aslani F., Kelin J. Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates exposed to elevated temperatures // *Journal*

of Cleaner Production. 2018. Vol. 200. Pp. 1009–1025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.323

27. Wang Z., Zhang H., Wang Z., Yu O. Rheological and mechanical performances of ultralightweight expanded polystyrene concrete: Synergistic effect of accelerator and multiscale fibers // *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 476. P. 141265. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141265

28. Патент RU № 2548303 С1. Высокопрочный легкий фибробетон / Королев Е.В., Иноземцев А.С.; заявл. от 11.04.2014. Опубл. 20.04.2015. EDN ZFGSHZ

29. Иноземцев А.С., Королев Е.В. Высокопрочные легкие бетоны : монография. СПб. : СПбГАСУ, 2022. 192 с. EDN UCJRAZ.

30. Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Реологические свойства самоуплотняющихся легких бетонных смесей на полых микросферах // *Строительство: наука и образование*. 2024. Т. 14. № 1. С. 135–148. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.9. EDN UHPUAB.

31. Епихин С.Д., Иноземцев А.С. Физико-механические свойства самоуплотняющихся легких бетонов на полых микросферах // *Современное строительство и архитектура*. 2024. № 11 (54). DOI: 10.60797/mca.2024.54.5. EDN GNNJGQ.

Поступила в редакцию 1 октября 2025 г.

Принята в доработанном виде 13 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 16 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Дмитриевич Епихин** — аспирант, преподаватель, кафедра строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1168083, ResearcherID: JHT-0817-2023, ORCID: 0009-0004-0193-1904; epikhinsd@mgsu.ru;

**Александр Сергеевич Иноземцев** — доктор технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2444-1204, Scopus: 55889834500, ResearcherID: K-6341-2013, ORCID: 0000-0001-7807-688X; InozemcevAS@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Епихин С.Д. — выполнение экспериментальных работ, подготовка текста статьи, формулирование выводов. Иноземцев А.С. — научное руководство, постановка цели и задач исследования, анализ и экспертиза результатов, формулирование выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Usova A.V. Modern concretes in construction and their application. *Trends in the development of science and education*. 2021; 74-4:102-105. DOI: 10.18411/lj-06-2021-149. EDN HDJONR. (rus.).

2. Rylskaya K.A., Nichinsky A.N. Methods of modification of properties of concrete mix and heavy concrete. *Actual issues of modern science : collection of articles based on the materials of the XX international scientific and practical conference*. 2019; 193-197. EDN HPHXMJ. (rus.).

3. Kravtsov A.V., Tsybakin S.V. The usage of the polycarboxylate based chemical plasticizing admixtures in the concrete. *Proceedings of the Kostroma State Agricultural Academy*. 2015; 50-55. EDN VZCXRL. (rus.).

4. Solovyev A.K., Solovyov K.A., Stekolnikov N.V. Self-compacting concrete in architectural structures. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2018; 2(43):171-184. EDN UORRCZ. (rus.).

5. Sorgutov I.V., Ivanov P.Y., Kryukova O.V. The use of self-compacting concrete in the construction

of monolithic buildings and structures in the Russian Federation. *System Technologies*. 2021; 3(40):14-20. EDN MGMXHQ. (rus.).

6. Movsisyan A.M. The influence of the use of Self-compacting concrete in monolithic structures on the effectiveness of the construction of a construction site. *Modern Scientific Researches and Innovations*. 2024; 2(154). EDN UKGYLK. (rus.).

7. Fedyuk R.S., Mochalov A.V., Lesovik V.S., Gridchin A.M., Fisher H.B. Composite bonding and self-fitting fibrobetons for protective facilities. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2018; 7:77-85. DOI: 10.12737/article\_5b4f02bf93df52.30110991. EDN XVLQJV. (rus.).

8. Mozgalev K.M., Golovnev S.G. Self-compacting concretes: application possibilities and properties. *Academic Bulletin of the UralNIiproekt RAASN*. 2011; 4:55-60. EDN ONJNAZ. (rus.).

9. Falikman V.R., Deniskin V.V., Kalashnikov O.O., Sorokin V.Y. Domestic experience in the production and use of self-compacting concrete. *National Association of Scientists*. 2015; 2-3(7):68-73. EDN YMGQDD. (rus.).

10. Batyanovskiy E.I., Bondarovich A.I., Kalinovskaya N.N., Ryabchikov P.V. Self-compacting concrete and concreting technology for foundation block using 9000 cubic meters of concrete. *Science and Technique*. 2021; 20(4):329-337. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-4-329-337. EDN RIPRJM. (rus.).

11. Mandal R., Panda S.K., Nayak S. Evaluation of the rheological properties of self-compacting recycled aggregate concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 93:170-175. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.114

12. Erofeev V.T., Sanyagina Ya.A., Erofeeva I.V., Maksimova I.N. Selection of compositions of decorative finishing powder-activated concrete with a grain texture surface by rheological properties. *Regional Architecture and Engineering*. 2022; 3(52):16-31. DOI: 10.54734/20722958\_2022\_3\_16. EDN OVYJCE. (rus.).

13. Jiao D., Shi C., Yuan Q., An X., Liu Y., Li H. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete : a review. *Cement and Concrete Composites*. 2017; 83:146-159. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.07.016

14. Mandal R., Panda S.K., Nayak S. Rheology of Concrete: Critical Review, recent Advancements, and future perspectives. *Construction and Building Materials*. 2023; 392:132007. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132007

15. Kaufmann J., Winnefeld F., Hesselbarth D. Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Composites*. 2004; 26(5):541-549. DOI: 10.1016/S0958-9465(03)00070-2

16. Zhang X., Han J. The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste.

*Cement and Concrete Research*. 2000; 30(5):827-830. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00236-2

17. Lee S.H., Kim H.J., Sakai E., Daimon M. Effect of particle size distribution of fly ash–cement system on the fluidity of cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2003; 33(5):763-768. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)01054-2

18. Chen J.J., Kwan A.K.H. Superfine cement for improving packing density, rheology and strength of cement paste. *Cement and Concrete Composites*. 2012; 34(1):1-10. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.09.006

19. Li T., Liu J. Effect of aggregate size on the yield stress of mortar. *Construction and Building Materials*. 2021; 305:124739. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124739

20. Benaicha M., Jalbaud O., Alaoui A.H., Burtshell Y. Porosity effects on rheological and mechanical behavior of self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*. 2022; 48:103964. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103964

21. Adhikary S.K., Ashish D.K., Sharma H., Patel J., Rudzionis Z., Al-Ajamee M. et al. Lightweight self-compacting concrete : a review. *Resources, Conservation & Recycling Advances*. 2022; 15:200107. DOI: 10.1016/j.rcradv.2022.200107

22. Kumar P., Pasla D., Saravanan T.J. Self-compacting lightweight aggregate concrete and its properties : a review. *Construction and Building Materials*. 2023; 375:130861. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130861

23. Kumar P., Dinakar P., Saravanan T.J. Development and performance analysis of structural lightweight aggregate self-compacting concrete: A sustainable solution. *Process Safety and Environmental Protection*. 2025; 197:107052. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107052

24. Kuttagola I., Prashanth M.H. Development and performance evaluation of self-compacting lightweight alkali-activated concrete incorporating hydroton clay balls. *Structures*. 2025; 71:108124. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.108124

25. Palacio A.J., Raggiotti B.B., Rougier V.C. Development and experimental verification of a design method for steel fibre-reinforced high strength lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2024; 453:139012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139012

26. Aslani F., Kelin J. Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates exposed to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 200:1009-1025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.323

27. Wang Z., Zhang H., Wang Z., Yu O. Rheological and mechanical performances of ultralightweight expanded polystyrene concrete: Synergistic effect of accelerator and multiscale fibers. *Construction and Building Materials*. 2025; 476:141265. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141265

28. Patent RU No. 2548303 C1. *High-strength lightweight fiber-reinforced concrete* / Korolev E.V., Inozemtsev A.S.; declared 11.04.2014. Publ. 20.04.2015. EDN ZFGSHZ

29. Inozemtsev A.S., Korolev E.V. *High-strength lightweight concretes : monograph*. St. Petersburg, SPbGASU, 2022; 192. EDN UCJRAZ. (rus.).

30. Epikhin S.D., Inozemtsev A.S. Rheological properties of self-compacting lightweight con-

crete mixtures on hollow microspheres. *Construction: Science and Education*. 2024; 14(1):135-148. DOI: 10.22227/2305-5502.2024.1.9. EDN UHPUAB. (rus.).

31. Epikhin S.D., Inozemtcev A.S. Physical and mechanical properties of self-compacting lightweight concretes on hollow microspheres. *Modern Construction and Architecture*. 2024; 11(54). DOI: 10.60797/mca.2024.54.5. EDN GNNJGQ. (rus.).

Received October 1, 2025.

Adopted in revised form on October 13, 2025.

Approved for publication on February 16, 2026.

**BI O N O T E S :** **Sergey D. Epikhin** — postgraduate student, lecturer, Department of Building Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1168083, ResearcherID: JHT-0817-2023, ORCID: 0009-0004-0193-1904; epikhinsd@mgsu.ru;

**Aleksandr S. Inozemtcev** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Building Materials Science; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2444-1204, Scopus: 55889834500, ResearcherID: K-6341-2013, ORCID: 0000-0001-7807-688X; InozemtcevAS@mgsu.ru.

*Contribution of the authors:*

*Sergey D. Epikhin — performing experimental work, preparing the text of the article, formulation of conclusions.*

*Aleksandr S. Inozemtcev — scientific guidance, setting the goals and objectives of the study, analysis and examination of results, drawing conclusions.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

## Прогнозирование тепловых потерь через ограждающие конструкции с учетом изменения влажности материалов

Оксана Александровна Малыгина, Владимир Ильич Соколов

*Луганский государственный университет имени Владимира Даля  
(ЛГУ им. В. Даля); г. Луганск, Луганская Народная Республика, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Актуальным направлением повышения эффективности систем отопления жилых зданий массовой застройки является использование теплоизоляционных материалов в наружных ограждающих конструкциях. На стадии проектирования выбор утеплителя производится на основе прогнозирования тепловых потерь через ограждающие конструкции по стандартным методикам, которые не учитывают изменение теплофизических свойств материалов в процессе эксплуатации, в частности изменение их влажности в течение отопительного периода. Цель исследования — разработка методики прогнозирования тепловых потерь систем отопления через наружные ограждающие конструкции с учетом изменения влажности теплоизоляционных материалов в процессе эксплуатации.

**Материалы и методы.** В основу предлагаемой методики положена математическая модель теплообмена в четырехслойной ограждающей конструкции, построенная с использованием полученных авторами экспериментальных зависимостей коэффициентов теплопроводности и влажностепроводности от сорбционной влажности для типовых теплоизоляционных материалов. Рассматриваемый конструктив состоит из внутреннего известкового штукатурного слоя; кирпичной (или бетонной) стены; теплоизоляционного материала и внешнего облицовочного слоя. Методика прогнозирования тепловых потерь реализована в среде программного комплекса COMSOL Multiphysics 6.2.

**Результаты.** Выполнены исследования теплофизических характеристик и тепловых потерь четырехслойной ограждающей конструкции с теплоизоляционными материалами IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЭКС КОМФОРТ на примере жилых зданий массовой застройки г. Луганска. Проведенное тепловизионное обследование утепленных ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий согласуется с результатами расчетов по предложенной методике.

**Выводы.** Разработанная методика прогнозирования обеспечивает повышение точности определения тепловых потерь систем отопления через наружные ограждающие конструкции за счет учета изменения влажности материалов в процессе эксплуатации. Применение методики позволяет оценивать энергоэффективность и экономическую целесообразность использования типовых теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** системы отопления, ограждающие конструкции, тепловые потери, теплофизические свойства, коэффициент теплопроводности, коэффициент влажностепроводности, сорбционная влажность, теплотехнические характеристики, моделирование, тепловизионное обследование

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Малыгина О.А., Соколов В.И. Прогнозирование тепловых потерь через ограждающие конструкции с учетом изменения влажности материалов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 3. С. 411–421. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.411-421

*Автор, ответственный за переписку:* Оксана Александровна Малыгина, oksalita@mail.ru.

## Predicting thermal loss through building envelopes taking into account changes of material moisture content

Oksana A. Malygina, Vladimir I. Sokolov

*Vladymyr Dahl Luhansk State University; Luhansk, Luhansk People's Republic, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The important way to improve the efficiency of residential building heating systems is to use thermal insulation materials in exterior building envelope. At the design stage, the choice of insulation is based on predicting heat loss through the walls using standard methodologies that do not take into account changes in the thermophysical properties of the materials during operation, such as changes of humidity during the heating season. The purpose of this paper is to develop the methodology for predicting heat loss through exterior building envelope, taking into account changes in the moisture content of the thermal insulation materials during operation.

**Materials and methods.** The proposed methodology is based on the mathematical model of heat and moisture transfer in the four-layer building envelope, which was developed using the authors' experimental data on the dependence of thermal conductivity and moisture conductivity coefficients from sorption moisture content for typical thermal insulation materials.

The structure under consideration consists of an internal lime plaster layer; a brick (or concrete) wall; thermal insulation material and an external facing layer. The methodology for predicting thermal losses was implemented in the COMSOL Multiphysics 6.2 software package.

**Results.** Studies of the thermotechnical characteristics and heat losses for the four-layer envelope structure with IZOVOL, TEHNOPAS PROF, PENOPLEX COMFORT thermal insulation materials were carried out on the example of residential buildings of mass construction in Lugansk. The conducted thermal imaging survey of insulated envelopes for operated buildings is consistent with the results of calculations according to the proposed methodology.

**Conclusions.** The developed predicting methodology ensures the accuracy increase of determining the heat loss of heating systems through exterior building envelopes, taking into account changes of the materials moisture content during operation. The application of this methodology allows assessing the energy efficiency and economic feasibility of using standard insulation materials in building envelopes.

**KEYWORDS:** heating systems, building envelopes, heat losses, thermophysical properties, thermal conductivity coefficient, moisture conductivity coefficient, sorption moisture content, thermotechnical characteristics, modeling, thermal imaging survey

**FOR CITATION:** Malygina O.A., Sokolov V.I. Predicting thermal loss through building envelopes taking into account changes of material moisture content. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(3):411-421. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.411-421 (rus.).

*Corresponding author:* Oksana A. Malygina, oksalita@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальным направлением повышения эффективности систем отопления жилых зданий массовой застройки является использование теплоизоляционных материалов в наружных ограждающих конструкциях [1–3]. Включение в конструкцию стены слоя утеплителя обеспечивает требуемые теплозащитные свойства здания в течение заданного периода эксплуатации [4–7]. В настоящее время особую важность данный вопрос приобретает для Луганской Народной Республики, где практически весь жилой фонд был построен в СССР согласно типовым проектам в соответствии с действующими в тот период нормами и стандартами.

На стадии проектирования выбор теплоизоляционного материала производится на базе прогнозирования тепловых потерь через наружные ограждающие конструкции по стандартным методикам, которые не учитывают изменение теплофизических свойств материалов в процессе эксплуатации, в частности изменение их влажности в течение отопительного периода. В то же время существует ряд подходов к исследованию процессов теплового переноса в ограждающих конструкциях, которые комплексно описывают процессы теплопроводности, конвективного теплообмена, теплопроводности и диффузии водяного пара с учетом межслойных и наружных граничных условий [8–11].

Ключевое из известных подходов к оценке тепловых потерь — это моделирование процессов теплопроводности на основе численного решения дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных и уравнения теплового потока при постоянных теплофизических свойствах материалов [12–14]. Наличие удобных интерфейсов в современных программных комплексах [15, 16] дает возможность рассчитывать теплотехнические характеристики многослойных ограждающих конструкций с произвольным выбором материалов слоев. Несмотря на свою простоту, этот подход сегодня

практически не используется ввиду низкой точности результатов моделирования, поскольку не учитывается изменение теплофизических свойств в процессе эксплуатации.

Добиться повышения точности определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций позволяет задание в расчет нормативных условий эксплуатации, сформированных с учетом изменения теплофизических свойств материалов в течение отопительного периода [17–19]. На основе такого подхода появляется возможность объективно анализировать энергоэффективность и экономическую целесообразность применения типовых теплоизоляционных материалов.

Необходимо отметить весомый вклад в развитие методов установления теплотехнических характеристик ограждающих конструкций, представленный в работах В.Г. Гагарина, В.В. Козлова, С.В. Корниенко, П.П. Пастушкова, А.Г. Перехоженцева [20–23], в которых показаны подходы для более точного моделирования влагопереноса в реальных условиях эксплуатации зданий.

В ряде работ авторов [24–27] рассмотрены вопросы моделирования отдельных аспектов процессов теплового переноса, в том числе экспериментально полученные зависимости коэффициентов теплопроводности и влажностепроводности от сорбционной влажности для типовых теплоизоляционных материалов IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЕКС КОМФОРТ.

Выполненный анализ убедительно показывает, что дальнейшее развитие методов прогнозирования тепловых потерь через ограждающие конструкции может быть достигнуто на базе численного моделирования комплексных процессов теплопроводности, конвективного теплообмена, влажностепроводности и диффузии водяного пара с учетом эмпирических зависимостей для теплофизических свойств материалов, полученных на основе экспериментальных исследований в реальных условиях эксплуатации.

Цель исследования — разработка методики прогнозирования тепловых потерь систем отопления через наружные ограждающие конструкции с учетом изменения влажности теплоизоляционных материалов в процессе эксплуатации.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В основу предлагаемой методики положена математическая модель тепловлагопереноса в четырехслойной ограждающей конструкции, построенная с использованием полученных авторами экспериментальных зависимостей коэффициентов теплопроводности и влагопроводности от сорбционной влажности для типовых теплоизоляционных материалов. Рассматриваемая конструкция (рис. 1) состоит из внутреннего известкового штукатурного слоя — 1; кирпичной (или бетонной) стены — 2; теплоизоляционного материала — 3; внешнего облицовочного слоя — 4. Каждый слой ограждающей конструкции имеет свою толщину  $\delta_i$ , где  $i$  — номер слоя. Общая толщина всей конструкции стены  $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4$ .

Для каждого  $i$ -го слоя ограждающей конструкции справедливо уравнение теплового потока и дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$q_i = -\lambda_i(W_i) \frac{\partial T_i}{\partial x}; \tag{1}$$

$$c_i(W_i)\rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_i(W_i) \frac{\partial T_i}{\partial x} \right), \tag{2}$$

где  $q_i = Q_i/A$  — плотность теплового потока  $Q_i$  через площадь изотермической поверхности  $A$  в  $i$ -м слое

ограждающей конструкции;  $\lambda_i(W_i)$  — коэффициент теплопроводности в  $i$ -м слое как функция  $W_i$ ;  $W_i$  — влажность в  $i$ -м слое;  $T_i$  — температура в  $i$ -м слое;  $x$  — координата;  $c_i(W_i)$  — теплоемкость материала  $i$ -го слоя как функция  $W_i$ ;  $\rho_i$  — плотность материала в  $i$ -м слое;  $t$  — время.

Граничные условия для температуры имеют вид:

$$\alpha_{in} (T_{in} - T_1(0)) = -\lambda_1(0) \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0}; \tag{3}$$

$$T_1(\delta_1) = T_2(\delta_1); \tag{4}$$

$$T_2(\delta_1 + \delta_2) = T_3(\delta_1 + \delta_2); \tag{5}$$

$$T_3(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) = T_4(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3); \tag{6}$$

$$-\lambda_4(\delta) \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \alpha_{out} (T_4(\delta) - T_{out}), \tag{7}$$

где  $\alpha_{in}$  и  $\alpha_{out}$  — коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней поверхности ограждающей конструкции;  $T_{in}$  — температура внутри помещения здания;  $T_{out}$  — температура наружного воздуха.

Для каждого  $i$ -го слоя записано уравнение переноса водяного пара и дифференциальное уравнение его диффузии:

$$G_i = -\mu_i(W_i) \frac{\partial P_i}{\partial x}; \tag{8}$$

$$\xi_i(W_i)\rho_n \frac{\partial P_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_i(W_i) \frac{\partial P_i}{\partial x} \right), \tag{9}$$

где  $G_i$  — поток водяного пара в  $i$ -м слое ограждающей конструкции;  $\mu_i(W_i)$  — коэффициент паропрони-

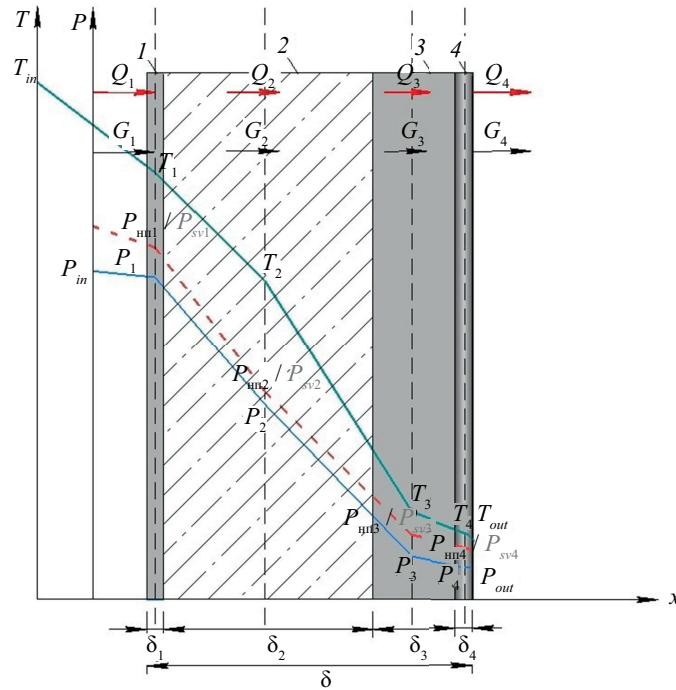


Рис. 1. Расчетная схема ограждающей конструкции

Fig. 1. The design scheme of the building envelope

чаемости  $i$ -го слоя как функция  $W_i$ ;  $P_i$  — парциальное давление в  $i$ -м слое;  $\zeta_i(W_i)$  — удельная пароемкость материала  $i$ -го слоя как функция  $W_i$ ;  $\rho_n$  — плотность водяного пара.

Граничные условия для парциального давления имеют вид:

$$P_1(0) = P_{in}; \quad (10)$$

$$P_1(\delta_1) = P_2(\delta_1); \quad (11)$$

$$P_2(\delta_1 + \delta_2) = P_3(\delta_1 + \delta_2); \quad (12)$$

$$P_3(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) = P_4(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3); \quad (13)$$

$$P_4(\delta) = P_{out}; \quad (14)$$

где  $P_{in}$  — парциальное давление внутри помещения;  $P_{out}$  — парциальное давление наружного воздуха.

Для каждого  $i$ -го слоя ограждающей конструкции справедливо уравнение потока капельной влаги и дифференциальное уравнение влагопроводности:

$$g_i = -\beta_i(W_i) \frac{\partial W_{fi}}{\partial x}; \quad (15)$$

$$\rho_i \frac{\partial W_{fi}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta_i(W_i) \frac{W_{fi}}{\partial x} \right), \quad (16)$$

где  $g_i$  — поток капельной влаги в  $i$ -м слое;  $\beta_i(W_i)$  — коэффициент влагопроводности в  $i$ -м слое как функция  $W_i$ ;  $W_{fi}$  — капельная влажность в  $i$ -м слое.

Граничные условия для влагосодержания имеют вид:

$$W_{f1}(0) = W_{fin}; \quad (17)$$

$$W_{f1}(\delta_1) = W_{f2}(\delta_1); \quad (18)$$

$$W_{f2}(\delta_1 + \delta_2) = W_{f3}(\delta_1 + \delta_2); \quad (19)$$

$$W_{f3}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) = W_{f4}(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3); \quad (20)$$

$$W_{f4}(\delta) = W_{fout}; \quad (21)$$

где  $W_{fin}$  — влагосодержание внутри помещения;  $W_{fout}$  — влагосодержание наружного воздуха.

Влажность в  $i$ -м слое является суммой сорбционной влажности  $W_{si}$  и капельной влажности  $W_{fi}$ :

$$W_i = W_{si} + W_{fi}. \quad (22)$$

Значения коэффициентов  $B_0, B_1$

The  $B_0$  and  $B_1$  coefficients values

Сорбционную влажность принято рассматривать как функцию относительной влажности воздуха:

$$W_{si} = f(\phi_i), \quad (23)$$

где  $\phi_i = P_i/P_{nmi}$  — относительная влажность в  $i$ -м слое;  $P_{nmi}$  — давление насыщенных паров в  $i$ -м слое:

$$P_{nmi} = 0,0215T_i^3 + 1,70T_i^2 + 48,08T_i + 613. \quad (24)$$

Принято считать, что если  $\phi_i < 1$ , то вся влага идет на изменение сорбционной влажности материала, т.е.:

$$W_i = W_{si} \text{ при } \phi_i < 1. \quad (25)$$

Начальные условия при моделировании нестационарных тепловлажностных процессов принимаются согласно известным подходам [8, 11, 12].

Как показывает анализ изменения теплофизических параметров в зависимости от влажности, что подтверждается в дальнейшем расчетами, наибольшее влияние на результаты моделирования оказывает изменение коэффициентов теплопроводности и влагопроводности, что позволяет принимать в рассмотрение только нормативные величины остальных параметров.

Влияние на коэффициенты теплопроводности теплоизоляционных материалов сорбционной влажности  $W_s$  описано линейной зависимостью [11, 27]:

$$\lambda = \lambda_{сух}(1 + k \cdot W_s), \quad (26)$$

где  $\lambda_{сух}$  — коэффициент теплопроводности материала в сухом состоянии;  $k$  — коэффициент, зависящий от вида теплоизоляционного материала.

По результатам экспериментальных исследований получены значения  $k$ : для утеплителя IZOVOL —  $k = 0,043$ , для утеплителя ТЕХНОФАС ПРОФ —  $k = 0,041$ , для утеплителя ПЕНОПЛЭКС КОМФОРТ —  $k = 0,032$ .

Влияние сорбционной влажности  $W_s$  на коэффициент влагопроводности  $\beta$  также представлено линейной зависимостью:

$$\beta = B_0 W_{si} + B_1, \quad (27)$$

где  $B_0, B_1$  — коэффициенты аппроксимации.

Значения  $B_0$  и  $B_1$  для типовых теплоизоляционных материалов приведены в таблице.

Тепловые потери можно характеризовать плотностью теплового потока (1), которая при стаци-

Теплоизоляционный материал Thermal insulation material	Коэффициенты аппроксимации Approximation coefficients	
	$B_0 \cdot 10^4$	$B_1 \cdot 10^2$
IZOVOL	0,057	-0,011
ТЕХНОФАС ПРОФ TECHNOFAS PROF	0,049	-0,019
ПЕНОПЛЭКС КОМФОРТ PENOPLEX COMFORT	1,370	-0,150



Рис. 2. Фото фасада здания

Fig. 2. The photo of the building facade

онарном режиме без учета граничных эффектов по периметру является одинаковой для всех сечений ограждающей конструкции.

Методика прогнозирования тепловых потерь реализована в программном комплексе (ПК) COMSOL Multiphysics 6.2 [15, 16], где с помощью интерфейсов Heat Transfer in Building Materials и Moisture Transport in Building Materials построена имитационная модель теплотехнических характеристик четырехслойной ограждающей конструкции.

Исходя из вышеизложенного, представленная методика реализуется с помощью имитационной модели в ПК COMSOL Multiphysics 6.2, где для проведения численной процедуры задаются геометрические размеры слоев ограждающей конструкции, теплофизические свойства материалов слоев, граничные и начальные условия. Численное моделирование осуществляется методом конечных элементов, а результаты расчета представляются в удобном для обработки и анализа виде.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С использованием предложенной методики выполнены исследования теплотехнических характеристик и тепловых потерь четырехслойной ограждающей конструкции с теплоизоляционными материалами IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЭКС КОМФОРТ на примере жилых зданий массовой застройки г. Луганска. Для оценки точности результатов расчета проводилось тепловизионное обследование утепленных ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий профессиональным тепловизором 256 × 192 MileseeY TR256E.

Результаты моделирования распределения температуры и относительной влажности в ограждающей конструкции кирпичного здания со слоем тепло-

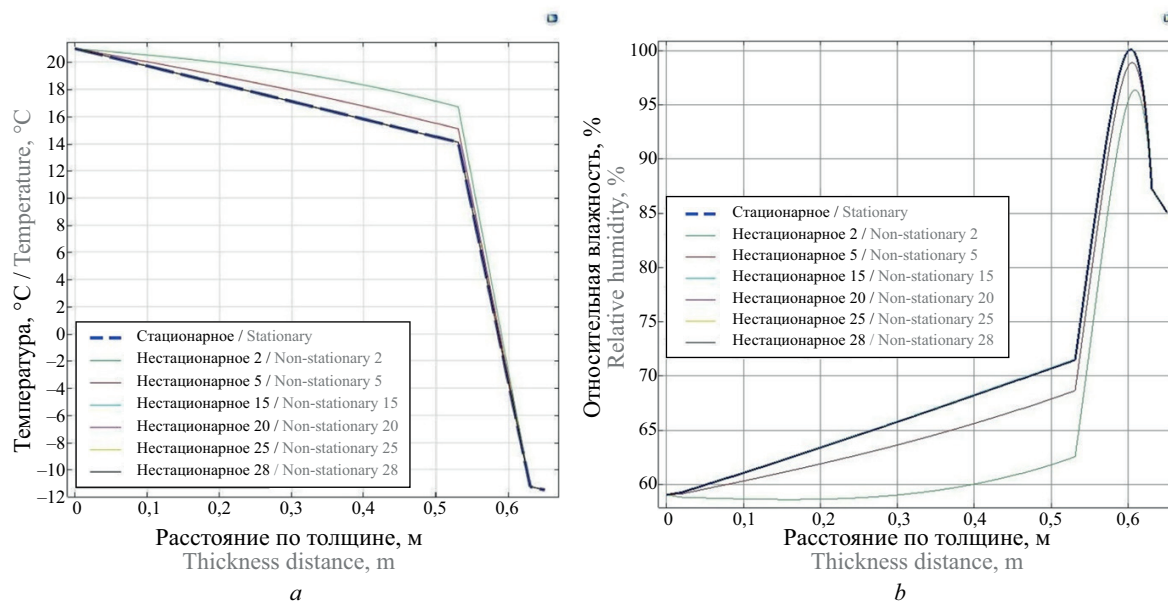


Рис. 3. Распределение температуры и относительной влажности в ограждающей конструкции кирпичного здания со слоем теплоизоляционного материала IZOVOL

Fig. 3. The temperature and relative humidity distribution in the brick building envelope with the IZOVOL thermal insulation material layer

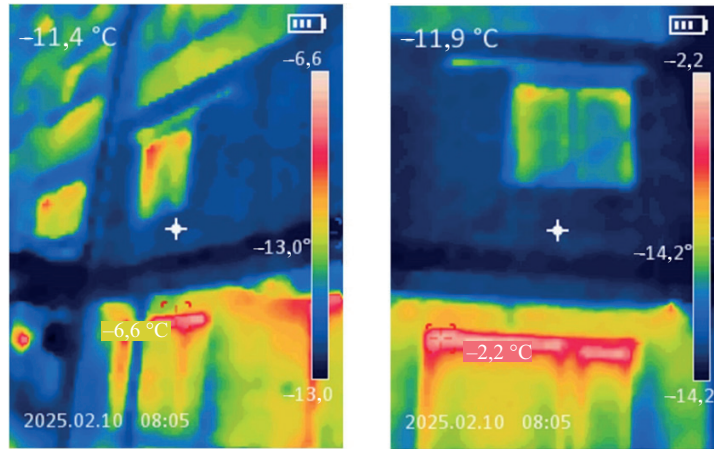


Рис. 4. Внешняя термограмма фасада здания

Fig. 4. The external thermogram of the building facade

изоляционного материала IZOVOL (рис. 2) показаны на рис. 3. Температура воздуха внутри помещения  $T_{in} = 21\text{ °C}$ , относительная влажность внутреннего воздуха  $\varphi_{in} = 52\%$ .

Как видно из представленных результатов, полученных для самого холодного месяца отопительного периода, в сечении кирпичной кладки (рис. 3, а) температура постепенно снижается от 21 до 14,1 °C, а в слое теплоизоляционного материала быстро уменьшается до -11,9 °C. Относительная влажность (рис. 3, б) по всей толщине кирпичной стены меняется равномерно от 59 до 74 %, а в толщине утеплителя наблюдается резкий скачок величины влажности до максимального значения, а затем уменьшение до 86 %. Тепловые потери с учетом изменения влажности составляют 8,57 Вт/м<sup>2</sup>, для нормативного условия эксплуатации в сухом состоянии 7,11 Вт/м<sup>2</sup>, а нормативного условия эксплуатации во влажном состоянии имеют значение 7,64 Вт/м<sup>2</sup>.

Внешняя термограмма тепловизионного обследования фасада здания с ограждающей конструкции кирпичного здания со слоем теплоизоляционного материала IZOVOL показана на рис. 4. Фактическая температура на поверхности фронтальных и торцевых стен, утепленных теплоизоляционным материалом, колеблется в пределах -11,4...-11,8 °C. По результатам компьютерного моделирования температура на внешней поверхности имеет значение -11,5 °C.

Результаты моделирования распределения температуры и относительной влажности в ограждающей конструкции панельного здания со слоем теплоизоляционного материала ТЕХНОФАС ПРОФ (рис. 5) показаны на рис. 6. Температура воздуха внутри помещения  $T_{in} = 21\text{ °C}$ , относительная влажность внутреннего воздуха  $\varphi_{in} = 54\%$ .

Как видно из представленных результатов, полученных для самого холодного месяца отопительного периода, в сечении панельной стены с утеплителем ТЕХНОФАС ПРОФ (рис. 6, а) температура

постепенно снижается от 21 до 8,6 °C, а в слое теплоизоляционного материала быстро уменьшается до -15,9 °C. Относительная влажность (рис. 6, б) по всей толщине кирпичной стены меняется равномерно от 57 до 78,3 %, а в толщине утеплителя наблюдается резкий скачок величины влажности до максимального значения, а затем уменьшение до 86 %. Тепловые потери с учетом изменения влажности составляют 16,29 Вт/м<sup>2</sup>, для нормативного условия эксплуатации в сухом состоянии 14,68 Вт/м<sup>2</sup>, а нормативного условия эксплуатации во влажном состоянии имеют значение 15,44 Вт/м<sup>2</sup>.



Рис. 5. Фото фасада здания

Fig. 5. The photo of the building facade

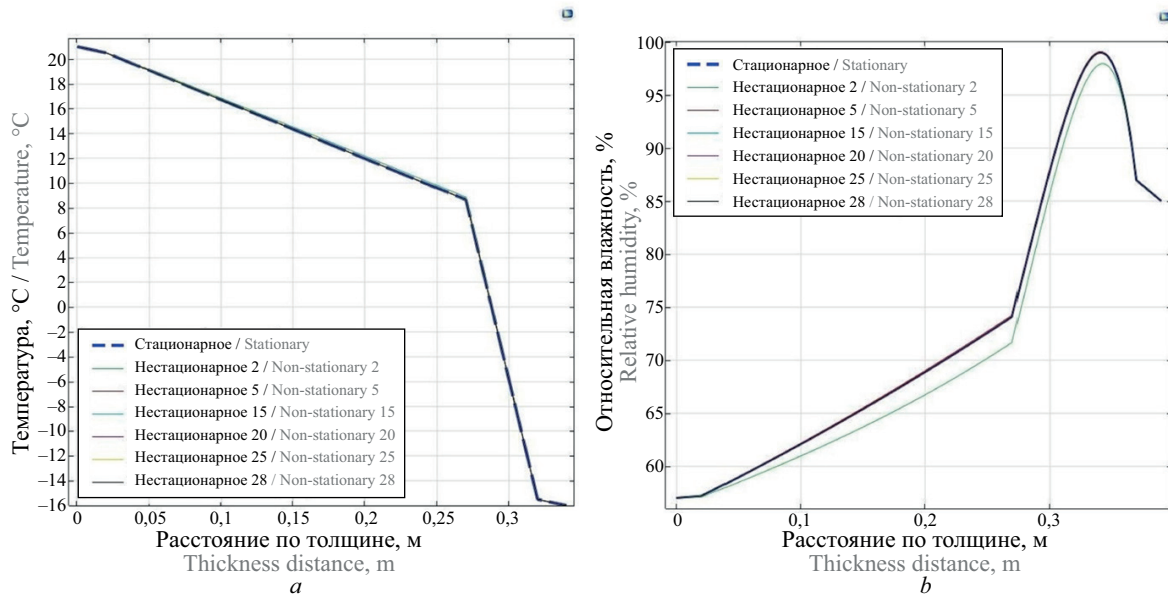


Рис. 6. Распределение температуры и относительной влажности в ограждающей конструкции панельного здания со слоем теплоизоляционного материала ТЕХНОФАС ПРОФ

Fig. 6. The temperature and relative humidity distribution in the panel building envelope with the TECHNOFAS PROF thermal insulation material layer

Внешняя термограмма тепловизионного обследования фасада здания с ограждающей конструкцией панельного здания со слоем теплоизоляционного материала ТЕХНОФАС ПРОФ показана на рис. 7. Фактическая температура на поверхности фронтальных и торцевых стен, утепленных теплоизоляционным материалом, колеблется в пределах  $-16,71...-16,73$  °C. По результатам численного моделирования температура на внешней поверхности имеет значение  $-16,6$  °C.

Проведенное тепловизионное обследование теплотехнического состояния утепленных ограждающих конструкций с теплоизоляционными материалами IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЭКС КОМФОРТ жилых зданий массовой застройки

г. Луганска с погрешностью до 2,6 % согласуется с результатами численных расчетов по предложенной методике.

Результаты расчета по предложенной методике показали, что реальные тепловые потери через ограждающие конструкции с учетом изменения влажности в условиях эксплуатации г. Луганска существенно отличаются от результатов, полученных для нормативных условий эксплуатации, в зависимости от вида применяемого утеплителя и месяца отопительного периода. Так, например, для кирпичных стен зданий при использовании теплоизоляционного материала IZOVOL расхождение результатов достигает 12,4 %, для панельных зданий с утеплителем ТЕХНОФАС ПРОФ максимальное расхождение составляет 9,8 %.

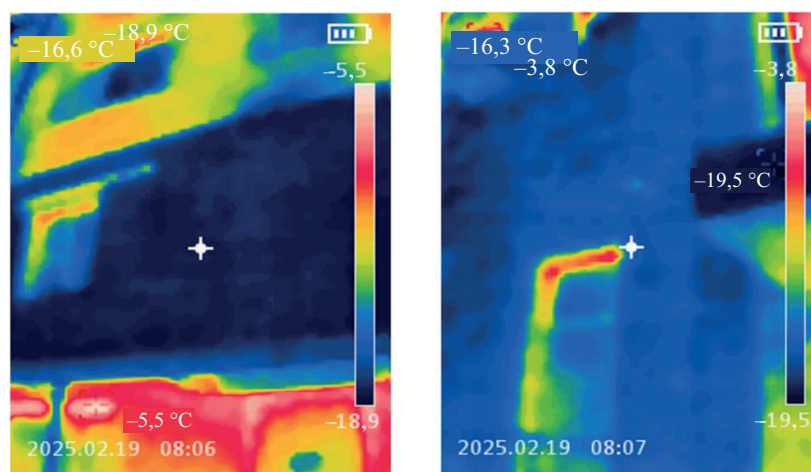


Рис. 7. Внешняя термограмма фасада здания

Fig. 7. The external thermogram of the building facade

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представлена методика прогнозирования тепловых потерь систем отопления через наружные ограждающие конструкции с учетом изменения влажности теплоизоляционных материалов в процессе эксплуатации.

В основу предлагаемой методики положена математическая модель теплообмена в четырехслойной ограждающей конструкции, построенная с использованием полученных авторами экспериментальных зависимостей коэффициентов теплопроводности и влажностеплопроводности от сорбционной влажности для типовых теплоизоляционных материалов. Рассмотрена конструкция, которая состоит из внутреннего известкового штукатурного слоя; кирпичной (или бетонной) стены; теплоизоляционного материала и внешнего облицовочного слоя. Математическая модель комплексно описывает процессы теплопроводности, конвективного теплообмена, влажностеплопроводности и диффузии водяного пара с учетом межслойных и наружных граничных условий. Методика прогнозирования тепловых потерь реализована в среде ПК COMSOL Multiphysics 6.2.

Выполнены комплексные исследования тепло-технических характеристик и тепловых потерь четырехслойной ограждающей конструкции с теплоизоляционными материалами IZOVOL, ТЕХНОФАС ПРОФ, ПЕНОПЛЭКС КОМФОРТ на примере жи-

лых зданий массовой застройки г. Луганска. Проведенное тепловизионное обследование утепленных ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий согласуется с результатами расчетов по предложенной методике. Показано, что реальные тепловые потери через ограждающие конструкции с учетом изменения влажности в условиях эксплуатации г. Луганска существенно отличаются от результатов, полученных для нормативных условий эксплуатации, в зависимости от вида применяемого утеплителя и месяца отопительного периода. Так, например, для кирпичных стен зданий при использовании теплоизоляционного материала IZOVOL расхождение результатов достигает 12,4 %, для панельных зданий с утеплителем ТЕХНОФАС ПРОФ максимальное расхождение составляет 9,8 %.

Разработанная методика прогнозирования обеспечивает повышение точности определения тепловых потерь систем отопления через наружные ограждающие конструкции за счет учета изменения влажности материалов в процессе эксплуатации. Применение предложенной методики прогнозирования тепловых потерь систем отопления позволяет выполнить оценку энергоэффективности и экономической целесообразности использования типовых теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях. Дальнейшее развитие рассмотренной методики представляется с учетом возможного переувлажнения материалов слоев ограждающих конструкций.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Nigumann E., Kalamees T., Kuusk K., Pihelo P.* Circular renovation of an apartment building with prefabricated additional insulation elements to nearly zero energy building // *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2024. Vol. 34. Issue 1. Pp. 22–34. DOI: 10.5755/j01.sace.34.1.35674

2. *Высоцкий Д.В., Татьянников Д.А.* Сравнение вариантов утепления производственного здания при реконструкции // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2020. № 2 (38). С. 57–67. DOI: 10.15593/2409-5125/2020.02.04. EDN ZNLRRP.

3. *Беликов К.Е.* Сравнение теплоизоляционных свойств различных видов утеплителя для строительства частных жилых домов // *Научный журнал молодых ученых*. 2021. № 3 (24). С. 33–38. EDN NXFZDI.

4. *Wang Q.* Thermal insulation performance analysis of high rise building envelope based on finite element analysis // *Thermal Science*. 2022. Vol. 26. Issue 3. Part A. Pp. 2361–2372. DOI: 10.2298/tsci2203361w

5. *Колосова А.С., Пикалов Е.С.* Современные эффективные теплоизоляционные материалы на неорганической основе // *Международный журнал приклад-*

*ных и фундаментальных исследований*. 2020. № 9. С. 64–75. EDN CTMUIL.

6. *Колосова А.С., Пикалов Е.С.* Современные эффективные теплоизоляционные материалы на органической основе // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2021. № 4. С. 74–85. EDN TUZZKY.

7. *Gamayunova O., Musorina T., Petrichenko M., Goremikins V.* Warming of panel houses in various climatic zones // *Proceedings of ECE 2019. Energy, Environmental and Construction Engineering*. 2020. Pp. 253–263. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3\_22. EDN BGWXUO.

8. *Zubarev K., Gagarin V.* Mathematical modeling of heat and moisture regimes of building for the facade thermal insulation composite system with mineral wool insulation // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022. Pp. 625–634. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2\_54

9. *Zubarev K., Gagarin V.* Heat and moisture transfer in building enclosing structures // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Pp. 257–266. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1\_26

10. *Sokolov V., Krol O., Chernikova I., Tsankov P., Salukvadze G.* Modeling of Aerodynamic Characteristics

of Ventilation Systems Based on Object Decomposition // Lecture Notes in Civil Engineering. 2025. Pp. 509–519. DOI: 10.1007/978-3-031-80482-3\_48

11. *Малыгина О.А.* Разработка математических моделей определения тепло-влажностного режима ограждающих конструкций зданий при нестационарном тепловом потоке // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 3 (52). С. 93–104. EDN NNKWXJ.

12. *Зайцева К.В., Титунин А.А., Гнедина Л.Ю., Ибрагимов А.М.* Тепло- и массоперенос в многослойном деревянном клееном бруссе: постановка задачи // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 8. С. 21–27. EDN UGYVTT.

13. *Кузина В.В., Ерёмкин А.И., Кошев А.Н., Пономарева И.К.* Математическое моделирование температурных и скоростных полей в конвективных потоках от нагретой поверхности отопительного прибора // Региональная архитектура и строительство. 2025. № 1 (62). С. 183–191. DOI: 10.54734/20722958\_2025\_1\_183. EDN JQAPWL.

14. *Павлова М.О., Захаров В.А., Квардакова А.М.* Исследование тепловых потерь через узел оконного откоса // Строительная механика и расчет сооружений. 2023. № 3 (308). С. 36–45. DOI: 10.37538/0039-2383.2023.3.36.45. EDN RIIGPA.

15. *Сучилин В.А., Кочетков А.С., Губанов Н.Н.* Моделирование в COMSOL Multiphysics энергосбережения типовых зданий ЖКХ при реконструкции и ремонте // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2020. № 6 (222). С. 44–50. EDN SWRRLH.

16. *Парфенов Г.И., Смирнов Н.Н., Яблоков А.А., Пыжов В.К.* Имитационное моделирование прикладных задач тепло- и воздухообмена в программе COMSOL Multiphysics. Иваново, 2023. 132 с.

17. *Цветков Н.А., Хуторной А.Н., Толстых А.В., Колесникова А.В.* Физико-математическая модель теплового переноса в ограждающих конструкциях из профилированного теплового бруса // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2017. № 2 (698). С. 12–20. EDN YTPOMP.

18. *Мусорина Т.А., Заборова Д.Д., Петриченко М.Р.* Математический аппарат для определения термического сопротивления однородной скалярной среды // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 8. С. 1037–1045. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1037-1045. EDN ANCYIM.

19. *Корниенко С.В.* Совершенствование методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций // AlfaBuild. 2020. № 1 (13). С. 1–6. DOI: 10.34910/ALF.13.1. EDN QJXQQH.

20. *Гагарин В.Г., Козлов В.В., Зубарев К.П.* Анализ расположения зоны наибольшего увлажнения в ограждающих конструкциях с различной толщиной теплоизоляционного слоя // Жилищное строительство. 2016. № 6. С. 8–12. EDN WFAXGN.

21. *Корниенко С.В., Чеснокова О.Г., Чеснокова В.Д., Журбенко М.Д.* Динамическое моделирование процесса теплового переноса в многослойных ограждениях // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 4 (85). С. 29–40. EDN СЕННWN.

22. *Гагарин В.Г., Пастушков П.П., Реутова Н.А.* К вопросу о назначении расчетной влажности строительных материалов по изотерме сорбции // Строительство и реконструкция. 2015. № 4 (60). С. 152–155. EDN UAXPEN.

23. *Перехоженцев А.Г.* О потенциале влажности, нормировании и расчете тепловлажностных характеристик наружных ограждений зданий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. № 3–4 (92). С. 39–48. EDN JRSXZX.

24. *Sokolov V.* Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems // Lecture Notes in Networks and Systems. 2019. Pp. 278–283. DOI: 10.1007/978-3-030-04792-4\_37

25. *Малыгина О.А.* Анализ теплотехнических свойств наружной ограждающей конструкции по итогам натурных испытаний // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2 (51). С. 129–139. EDN EDFZBP.

26. *Sokolov V.* Hydrodynamics of Flow in a Flat Slot with Boundary Change of Viscosity // Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021. Pp. 1172–1181. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9\_136

27. *Малыгина О.А., Засько В.В.* Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов во влажном состоянии // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2024. № 5 (169). С. 5–14. DOI: 10.71536/vd.2024.5c169.1. EDN MTXSIN.

Поступила в редакцию 10 октября 2024 г.

Принята в доработанном виде 16 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 7 декабря 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Оксана Александровна Малыгина** — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры проектирования и технологии строительства; **Луганский государственный университет имени Владимира Даля** (ЛГУ им. В. Даля); 291034, г. Луганск, Луганская Народная Республика, квартал Молодежный, 20а; SPIN-код: 2256-9279, РИНЦ ID: 761776, ORCID: 0000-0002-2799-6704; oksalita@mail.ru;

**Владимир Ильич Соколов** — доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства; **Луганский государственный университет имени Владимира Даля (ЛГУ им. В. Даля)**; 291034, г. Луганск, Луганская Народная Республика, квартал Молодежный, 20а; SPIN-код: 8668-7899, РИНЦ ID: 439665, Scopus: 57191822948, ResearcherID: G-9766-2018, ORCID: 0000-0003-0459-1824; sokolov.snu.edu@gmail.com.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

1. Nigumann E., Kalamees T., Kuusk K., Pihelo P. Circular renovation of an apartment building with prefabricated additional insulation elements to nearly zero energy building. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2024; 34(1):22-34. DOI: 10.5755/j01.sace.34.1.35674
2. Vysotsky D., Tatyannikov D. Comparison of insulation options for a production building during reconstruction. PNRPU Bulletin, Applied ecology. *Urban development*. 2020; 2(38):57-67. DOI: 10.15593/2409-5125/2020.02.04. EDN ZNLRPP. (rus.).
3. Belikov K.E. Comparison of the thermal insulation properties of various types of insulation for the construction of private residential buildings. *Scientific Journal of Young Scientists*. 2021; 3(24):33-38. EDN NXFZDI. (rus.).
4. Wang Q. Thermal insulation performance analysis of high rise building envelope based on finite element analysis. *Thermal Science*. 2022; 26(3 Part A): 2361-2372. DOI: 10.2298/tsci2203361w
5. Kolosova A.S., Pikalov E.S. Modern effective thermal insulation materials on inorganic base. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2020; 9:64-75. EDN CTMUIL. (rus.).
6. Kolosova A.S., Pikalov E.S. Modern effective thermal insulation materials on organic base. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2021; 4:74-85. EDN TUZZKY. (rus.).
7. Gamayunova O., Musorina T., Petrichenko M., Goremikins V. Warming of panel houses in various climatic zones. Proceedings of EECE 2019. *Energy, Environmental and Construction Engineering*. 2020; 253-263. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3\_22. EDN BGWXUO.
8. Zubarev K., Gagarin V. Mathematical modeling of heat and moisture regimes of building for the facade thermal insulation composite system with mineral wool insulation. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2022; 625-634. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2\_54
9. Zubarev K., Gagarin V. Heat and moisture transfer in building enclosing structures. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022; 257-266. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1\_26
10. Sokolov V., Krol O., Chernikova I., Tsankov P., Salukvadze G. Modeling of Aerodynamic Characteristics of Ventilation Systems Based on Object Decomposition. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2025; 509-519. DOI: 10.1007/978-3-031-80482-3\_48
11. Malygina O.A. Development of mathematical models of definition heat and humidity conditions of building enclosing structures with nonstationary heat flow. *Modern problems of civil protection*. 2024; 3(52):93-104. EDN NNKWXJ. (rus.).
12. Zaitseva K.V., Titunin A.A., Gnedina L.Yu., Ibragimov A.M. Heat and mass transfer in a multi-layer glued wooden beam: formulation of the problem. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 8:21-27. EDN UGYVTT. (rus.).
13. Kuzina V.V., Eremkin A.I., Koshev A.N., Ponomareva I.K. Mathematical modeling of temperature and velocity fields in convective flows from the heated surface of a heater. *Regional Architecture and Engineering*. 2025; 1(62):183-191. DOI: 10.54734/20722958\_2025\_1\_183. EDN JQAPWL. (rus.).
14. Pavlova M.O., Zaharov V.A., Kvardakova A.M. Study of heat loss through a window slope. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2023; 3(308):36-45. DOI: 10.37538/0039-2383.2023.3.36.45. EDN RIIGPA. (rus.).
15. Suchilin V.A., Kochetkov A.S., Gubanov N.N. Modeling in COMSOL Multiphysics of energy saving of typical housing and communal services buildings during reconstruction and repair. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2020; 6(222):44-50. EDN SWRRLH. (rus.).
16. Parfenov G.I., Smirnov N.N., Yablokov A.A., Pyzhov V.K. Simulation of applied heat and air exchange problems in the COMSOL Multiphysics program. Ivanovo, 2023; 132. (rus.).
17. Tsvetkov N.A., Khutornoy A.N., Tolstykh A.V., Kolesnikova A.V. A physico-mathematical model of heat and moisture transfer in building envelopes shaped heat timber. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2017; 2(698):12-20. EDN YTPOMP. (rus.).
18. Musorina T.A., Zaborova D.D., Petrichenko M.R. Mathematical apparatus for determination of homogenous scalar medium thermal resistance. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(8):1037-1045. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1037-1045. EDN ANCYIM. (rus.).
19. Korniyenko S.V. Improving methods of temperature and humidity calculation in enclosing structures.

*AlfaBuild*. 2020; 1(13):1-6. DOI: 10.34910/ALF.13.1. EDN QJXQQH. (rus.).

20. Gagarin V.G., Kozlov V.V., Zubarev K.P. Analysis of the zone location of maximum moistening in the wall system with different thickness of insulation layer. *Housing Construction*. 2016; 6:8-12. EDN WFAXGN. (rus.).

21. Kornienko S.V., Chesnokova O.G., Chesnokova V.D., Zhurbenko M.D. Dynamic modeling of heat and moisture transfer processes in multilayer fences. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2021; 4(85):29-40. EDN CEHHWH. (rus.).

22. Gagarin V., Pastushkov P., Reutova N. Usage of calculated definition of the operating humidity of thermal insulation materials. *Building and Reconstruction*. 2015; 4(60):152-155. EDN UAXPEH. (rus.).

23. Perekhozhentsev A.G. On the potential of humidity, rationing and calculation of heat and humidity characteristics of external fences of buildings. *Bulletin*

*of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*. 2023; 3-4(92):39-48. EDN JRSXZX. (rus.).

24. Sokolov V. Diffusion of Circular Source in the Channels of Ventilation Systems. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2019; 278-283. DOI: 10.1007/978-3-030-04792-4\_37

25. Malygina O.A. Analysis of the thermal properties of the outdoor the enclosing structure according to the results of field tests. *Modern Problems of Civil Protection*. 2024; 2(51):129-139. EDN EDFZBP. (rus.).

26. Sokolov V. Hydrodynamics of Flow in a Flat Slot with Boundary Change of Viscosity. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021; 1172-1181. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9\_136

27. Malygina O.A., Zasko V.V. Experimental determination of the thermal conductivity coefficient of thermal insulation materials in a wet state. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2024; 5(169):5-14. DOI: 10.71536/vd.2024.5c169.1. EDN MTXSIN. (rus.).

Received October 10, 2024.

Adopted in revised form on October 16, 2024.

Approved for publication on December 7, 2024.

**B I O N O T E S :** **Oksana A. Malygina** — Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Design and Construction Technology; **Vladymyr Dahl Luhansk State University**; 20a, Molodezhny Square, Luhansk, 291034, Luhansk People's Republic, Russian Federation; SPIN-code: 2256-9279, ID RSCI: 761776, ORCID: 0000-0002-2799-6704; oksalita@mail.ru;

**Vladimir I. Sokolov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director of the Institute of Construction, Architecture, and Housing and Communal Services; **Vladymyr Dahl Luhansk State University**; 20a, Molodezhny Square, Luhansk, 291034, Luhansk People's Republic, Russian Federation; SPIN-code: 8668-7899, ID RSCI: 439665, Scopus: 57191822948, ResearcherID: G-9766-2018, ORCID: 0000-0003-0459-1824; sokolov.snu.edu@gmail.com.

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

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

# ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 532.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.422-434

## Параметры ударного воздействия при аварийном падении тела на жидкость

Александр Андреевич Комаров, Юлия Вадимовна Брянская

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В ряде прикладных инженерных задач часто возникают вопросы, связанные с ударом массивных тел о жидкость и их движением после удара, например, определение динамических нагрузок при расследовании или прогнозировании аварийных ситуаций. Рассмотрена аварийная ситуация, вызванная транспортировкой контейнера, содержащего радиоактивные отходы, над бассейном выдержки, которыми оборудованы все атомные электростанции, обрыв крепления контейнера и его падение в бассейн с водой.

**Материалы и методы.** Изучены физические процессы, сопровождающие удар тяжелого тела о поверхность воды, общие принципы формирования и расчета гидродинамических нагрузок. Проанализирована возможность использования понятия «присоединенная масса» при физической трактовке данного явления. Приведены результаты модельных экспериментальных исследований и численного моделирования.

**Результаты.** Опираясь на данные модельных экспериментов и результаты численных расчетов, выделены четыре основные фазы движения тела при его падении в жидкость, сформулирована методология по определению зависимости от времени присоединенной массы, участвующей в ударе. Показано, что при ударе тела о воду существует зависимость от времени присоединенной массы, которая устанавливается геометрическими параметрами бассейна.

**Выводы.** В ходе модельных экспериментов выявлено, что ударное давление, реализуемое при касании плоского тела о воду, значительно меньше, чем это следует из решения задачи о распаде произвольного разрыва. Максимальное давление, полученное расчетным путем, в 3–4 раза больше, чем давление, полученное опытным путем, что можно объяснить наличием воздушной прослойки между плоским дном тела и свободной поверхностью воды.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ударное воздействие, аварийная ситуация, задача о распаде произвольного разрыва, присоединенная масса, нестационарные нагрузки, разностные методы расчета, граничные условия

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Комаров А.А., Брянская Ю.В. Параметры ударного воздействия при аварийном падении тела на жидкость // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 3. С. 422–434. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.422-434

*Автор, ответственный за переписку:* Юлия Вадимовна Брянская, mgsu-hydraulic@yandex.ru.

## Impact parameters in case of an emergency fall of a body onto a liquid

Alexandr A. Komarov, Yuliya V. Bryanskaya

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

### ABSTRACT

**Introduction.** In a number of applied engineering problems, questions related to the impact of massive bodies on water and their motion in the water after the impact often arise. Renowned Russian and international scientists, including L.I. Sedov, M.V. Keldysh, G. Wagner, T. Karman, and others, conducted theoretical and practical research in this area of hydrodynamics. Problems involving determining the dynamic loads arising in liquid-filled containers when various large objects fall into them often arise during the investigation or prediction of emergency situations. This paper examines the problem of an emergency involving the transportation of a container containing radioactive waste over a spent fuel pool, which is found at all nuclear power plants. The container's attachment breaks, and it falls into the pool. Determining the loads arising in such a scenario is a mandatory task for all nuclear power plants.

**Materials and methods.** This paper describes in detail the physical processes accompanying the impact of a heavy, flat-bottomed body on a water surface and formulates general principles for the formation and calculation of hydrodynamic loads arising in a fluid. The feasibility of using the concept of “added mass” in the physical interpretation of this phenomenon is analyzed. The limits of its validity in considering various problems of unsteady hydrodynamics are indicated. The results of model experimental studies aimed at studying the impact pressure arising in water when a heavy, flat-bottomed body falls into it are presented. The well-known Godunov method, based on the problem of the decay of an arbitrary discontinuity, was

used in the mathematical description of the hydrodynamic phenomena under consideration. This method allows one to determine the dynamic parameters of pressure and velocity of a fluid in the presence of significant discontinuities in the initial and boundary conditions.

**Results.** Based on data from model experiments and the results of numerical calculations, the authors identified four main phases of a body's motion as it falls into a liquid. A series of computational experiments was used to formulate a methodology for determining the time dependence of the added mass involved in the impact. It was shown that when a body impacts water contained in a confined pool, there is a time dependence of the added mass, which is determined by the geometric parameters of the pool. As an example, the paper presents several instantaneous impact pressure profiles generated in a pool when a flat body impacts water. Examples of maximum pressure fields generated in a pool when a massive body impacts water are also given.

**Conclusions.** Model experiments revealed that the shock pressure generated when a flat body impacts water is significantly lower than predicted by the solution to the problem of the decay of an arbitrary discontinuity. The maximum pressure obtained through calculations is 3–4 times greater than that obtained experimentally. The significant reduction in shock load is caused by the presence of an air gap between the flat bottom of the body and the free surface of the water. The presence of an air bubble (air gap) beneath the body leads to an increased time for the formation of a stable hydrodynamic flow around the body and, consequently, a decrease in the intensity of the shock wave.

**KEYWORDS:** impact action, emergency situation, problem of decay of an arbitrary discontinuity, added mass, non-stationary loads, difference calculation methods, boundary conditions

**FOR CITATION:** Komarov A.A., Bryanskaya Yu.V. Impact parameters in case of an emergency fall of a body onto a liquid. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(3):422-434. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.422-434 (rus.).

*Corresponding author:* Yuliya V. Bryanskaya, mgsu-hydraulic@yandex.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Темой удара тела о поверхность жидкости начали интересоваться в первые десятилетия XX в. в связи с посадкой гидросамолетов на воду. Основу этого научного направления заложили известные российские ученые Л.И. Седов и М.В. Келдыш, а за рубежом известные исследователи Г. Вагнер и Т. Карман.

С развитием техники произошло значительное расширение вопросов, касающихся ударных воздействий тел о поверхность жидкости. Большое внимание этой проблематике уделяет оборонная промышленность. Например, вопрос входа в воду объектов, направленных на поражение подводных лодок противника, не теряет своей актуальности и требует постоянных уточнений. В гражданской деятельности с задачами подобного рода приходится сталкиваться при проектировании и расчетах на прочность объектов судостроения. При этом, несмотря на достаточную проработанность рассматриваемой задачи [1–17], определенные проблемы в ее разрешении остаются.

Особое положение в решении задач о входе тела в воду занимают вопросы, связанные с аварийным падением массивных тел в жидкость и с прогнозированием динамических нагрузок, возникающих при этом в жидкости. Обусловлено это тем, что в приложениях к эксплуатационным ситуациям основное внимание уделяется динамическому воздействию жидкости на входящий в нее объект для обеспечения его эксплуатационных характеристик. При решении указанных задач начальные и граничные условия известны достаточно точно и подробно. В приложениях, связанных с аварийными ситуациями, начальные и граничные условия известны довольно приблизительно, а наибольший интерес представляют динамические параметры нагрузок, возникающих в самой жидкости. Точность решения задач, касающихся численных значений

ударных нагрузок, возникающих при падении тел в воду, зависит от множества параметров: начальной скорости входа тела в жидкость; угла входа тела; массы и геометрии тела; параметров резервуара; условий сжатия воздушной среды, находящейся между телом и свободной поверхностью жидкости в момент удара; физических свойств жидкости; упругости тела и от множества других факторов [18–21]. Однако при решении проблем, связанных с аварийными ситуациями, когда начальные и граничные условия известны приблизительно, необходимо рассматривать упрощенный вариант расчетной схемы, но с учетом ключевых особенностей физического процесса.

В настоящей статье рассматривается аварийное падение в бассейн с водой массивного контейнера, содержащего радиоактивный материал. Указанная аварийная ситуация может реализоваться на атомных электростанциях, и необходимость решения указанной проблемы регулируется нормативной базой<sup>1</sup>.

Решение подобных задач даже с учетом схематизации исследуемого процесса вызывает значительные математические и вычислительные трудности [22]. Свяzano это с резко нестационарным характером движения жидкости при ударном воздействии на нее падающего тела, со струйными явлениями, с образованием всплесков и брызг при ударе, с формированием разрывных явлений в жидкости и т.д.

Основной интерес представляет начальный момент удара тела о жидкость, потому что в этот период формируются максимальные гидродинамические нагрузки, вызывающие движение жидкости.

<sup>1</sup> РД 95 10534–96. Руководство по определению нагрузок на строительные конструкции и оборудование атомных станций при падении в бассейн, заполненный водой, контейнера или других тел.

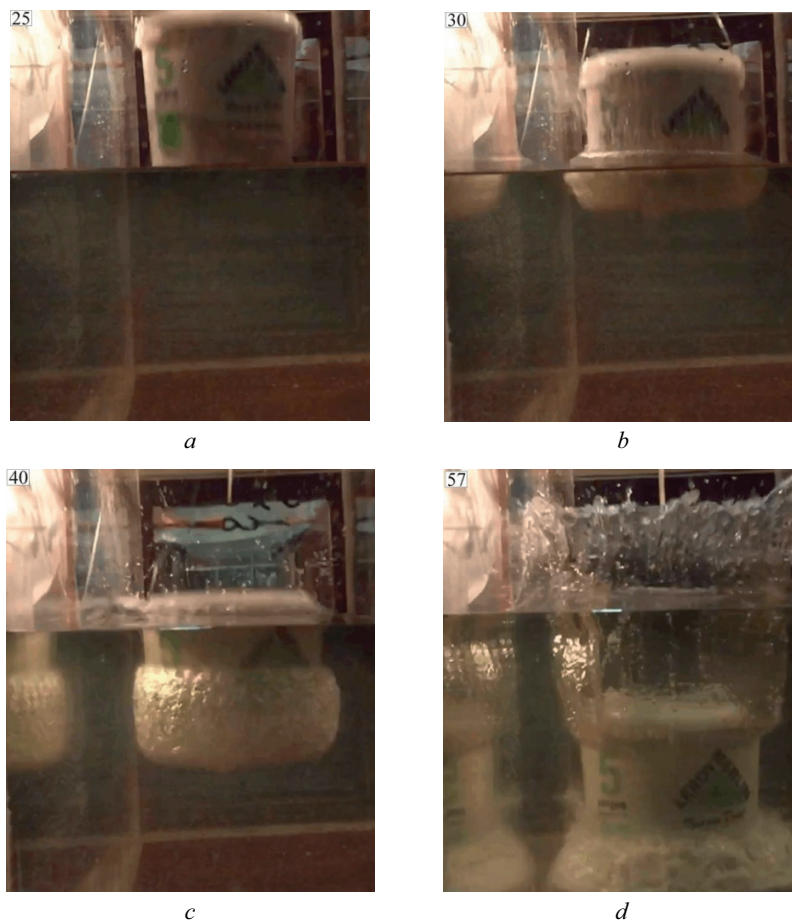


Рис. 1. Фотографии процесса падения тела с плоским дном в воду

Fig. 1. Photographs of a flat-bottomed body falling into water

Процесс возникновения в жидкости в момент удара волн сжатия часто трактуется как появление присоединенной массы. Хотя это не совсем так, и об этом будет сказано далее более подробно.

Следует отметить, что при падении плоского тела на свободную поверхность жидкости между дном тела и жидкостью возникает воздушная прослойка в результате захвата воздуха телом и увлечения его в жидкость [23, 24]. Данное явление иллюстрируют фотографии, приведенные на рис. 1. Это кадры киносъемки падения с высоты 1 м 5-литрового пластикового ведра, залитого бетоном. На рис. 1, *a* показан момент касания тела с плоским дном поверхности жидкости. На рис. 1, *b* представлен момент времени, когда сжатая прослойка воздуха, расширяясь, создает вблизи дна падающего тела своеобразную бахрому из смеси воды и мелких пузырьков воздуха. Момент увлечения телом на дно резервуара сформировавшейся при ударе газовой прослойки приведен на рис. 1, *c*. На рис. 1, *d* показан момент удара тела о дно бассейна.

Эксперименты продемонстрировали, что в момент удара тела о воду между плоским дном тела и свободной поверхностью жидкости образуется прослойка воздуха, которая значительно меняет параметры ударных волн сжатия, возникающих в воде.

Интенсивность ударного воздействия уменьшается на порядок при падении в воду тела, имеющего плоское дно.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Прежде всего необходимо охарактеризовать физическую картину исследуемого явления. Она, а также основные гидродинамические соотношения, описывающие процесс удара тела о свободную поверхность жидкости, подробно изложены в работах [25, 26].

Остановимся на ключевых моментах, связанных с формированием ударных нагрузок, возникающих непосредственно в момент удара тела о жидкость.

Сначала рассмотрим ситуацию, когда тело массой  $M_T$ , движущееся со скоростью  $V_0$ , производит удар о свободную поверхность жидкости в безвоздушном пространстве, т.е. в момент удара воздушная прослойка между телом и жидкостью отсутствует. При ударе тела о воду любое возмущение, создаваемое в жидкости телом, будет распространяться по движущейся жидкости, движение которой было вызвано ударом тела за предыдущее время. Поэтому при длительности удара  $\tau$  в движение будет приведен слой воды, толщина которого составит  $C \cdot \tau$ , где

$C$  — скорость распространения малых возмущений в воде. Таким образом, за время удара тела о жидкость конкретная масса жидкости должна начать двигаться и иметь определенный импульс. На величину приобретенного водой импульса должен уменьшиться импульс тела. В ряде источников [25] массу жидкости, которая приводится в движение во время удара, называют присоединенной массой жидкости  $M_{пр}$ . В связи с потерей телом импульса его скорость после удара о жидкость будет равна:

$$V_B = \frac{M_T}{M_T + M_{пр}} \cdot V_0, \quad (1)$$

что следует из закона сохранения импульса.

Проанализируем правомерность использования термина «присоединенная масса» применительно к изучаемой задаче. Актуальность данного вопроса связана с тем, что подобные вопросы часто возникают в технических приложениях нестационарной гидродинамики. При этом в рассматриваемых задачах часто применяют Фурье-анализ, предполагающий решение в спектральной области. Например, задача смещения напорного гидротехнического сооружения под действием сейсмических колебаний.

Напомним, что под присоединенной массой принято считать массу жидкости, вовлекаемую в движение движущимся телом, которая получается путем нормирования к скорости тела импульса движущейся жидкости. Поэтому при неравномерном движении тела в жидкости его массу следует увеличивать на присоединенную массу жидкости или газа [27]. Тогда тело с увеличенной массой будет двигаться в пустоте таким же образом, как и тело с реальной массой будет двигаться в жидкости или газе [27]. Например, для тел сферической формы присоединенная масса составляет массу жидкости с объемом, равным половине от объема тела. Для квадратной пластины, двигающейся поперек потока и имеющей грань с размером  $D$ , присоединенная масса составляет  $M_{пр} = \pi \rho D^3 / 4$ , где  $\rho$  — плотность жидкости, в которой движется квадратная пластина [28].

Естественно, что в подобной трактовке понятия присоединенная масса представляется, что все возмущения, вызываемые нестационарными движениями тела, уходят в бесконечность и не возвращаются обратно в виде волн, отраженных от каких-либо внутренних границ. Именно поэтому численное значение присоединенной массы зависит только от геометрических параметров движущегося тела и не зависит от времени. При наличии границ в жидкости или газе использование общепринятого понятия «присоединенная масса» не совсем правомерно, так как отраженные от границ возмущения, вызванные нестационарным движением тела, могут существенно влиять на кинематику тела и приводить к зависимости численного значения присоединенной массы от времени. Это обстоятельство ставит под сомне-

ние целесообразность применения термина «присоединенная масса» в подобных ситуациях.

Для подтверждения сказанного выше проведены экспериментальные исследования и численные расчеты.

При выполнении модельных экспериментов фиксировалось динамическое давление в неподвижной воде при падении в нее тела с массой  $M_T = 47$  кг. Эксперимент осуществлялся в лаборатории НТЦ «Взрывоустойчивость» НИУ МГСУ при следующих значениях параметров установки. Линейные размеры тела: диаметр  $D_T = 16,8$  см, высота  $L_T = 42$  см. Скорость подлета тела к поверхности воды составляла  $V = 2,43$  м/с. Размеры емкости с водой: диаметр емкости  $D = 20,0$  см, глубина воды  $H = 45$  см.

Математическая модель, положенная в основу численных расчетов, базируется на методе Годунова, разработанного для расчета разрывных течений в гидрогазодинамике [17, 24, 26, 29, 30]. Метод Годунова основан на задаче о распаде произвольного разрыва, что допускает проводить расчеты применительно к разрывным течениям и вычислять на всех расчетных шагах давление  $P_p$  и скорость  $U_p$  среды между всеми ячейками расчетной области. Это позволяет определять потоки массы и импульса, которыми обмениваются между собой расчетные ячейки.

Расчеты выполнялись по явной разностной схеме, которая аппроксимирует уравнения сохранения массы и импульса (уравнение энергии применительно к данной задаче не использовалось):

$$\begin{cases} (P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n) + \frac{\tau \cdot c^2}{\Delta x} \cdot (M_{i,j+1} - M_{i,j-1}) + \\ + \frac{\tau \cdot c^2}{\Delta y} \cdot (M_{i+1,j} - M_{i-1,j}) = 0; \\ (u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n) + \frac{\tau}{\Delta x \cdot \rho} \cdot (I_{i,j+1} - I_{i,j-1}) = 0; \\ (v_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^n) + \frac{\tau}{\Delta y \cdot \rho} \cdot (I_{i+1,j} - I_{i-1,j}) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $M = \rho \cdot U_p$  — поток массы;  $I = P_p + \rho \cdot U_p^2$  — поток импульса;  $\rho$  — плотность жидкости.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим физические аспекты падения тела в бассейн с водой. На рис. 2 приведены четыре фазы движения тела.

Первая фаза (рис. 2, а) — движение тела происходит под действием силы тяжести (падение тела с высоты  $H_T$ ). Скорость подлета тела к воде определяется как  $V_0 = \sqrt{2gH_T}$ . Сопротивлением воздуха на этой фазе движения тела можно пренебречь. Вторая фаза (рис. 2, б) движения тела связана с процессом его входа в воду. На этом этапе тело за достаточно малый отрезок времени  $\tau$  приводит в движение жидкость, находящуюся в бассейне, и при этом

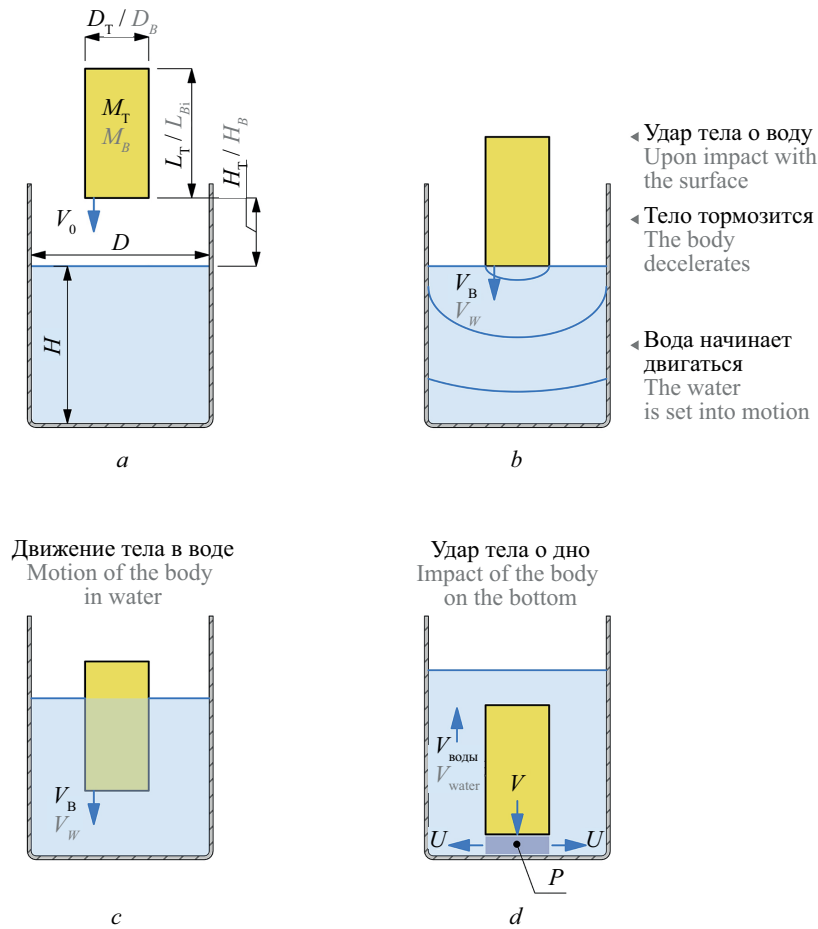


Рис. 2. Основные фазы движения тела при его падении в бассейн с водой  
 Fig. 2. The main phases of a body's movement when it falls into a pool of water

теряет часть своего импульса, который передается приведенной в движение жидкости. На третьем этапе отмечается изменение скорости тела, связанное с гидродинамическими сопротивлениями, сопровождающими его погружение и движение по жидкости бассейна. При подходе тела ко дну (четвертая фаза движения тела) происходит его резкое торможение и остановка. Схематично зависимость скорости тела от времени изображена на рис. 3.

Фотографии, иллюстрирующие четыре описанные выше фазы движения тела, приведены на рис. 1.

Проанализируем фазу удара тела о воду подробнее (вторая фаза движения тела). На рис. 2, b показана схема момента контакта тела с водой. В приведенной схеме предполагается, что падение тела происходит в безвоздушном пространстве. Рассмотрим сначала удар тела о воду при отсутствии воздуха. Для установления физической природы второй фазы удара тела о воду проведем некоторые численные расчеты.

На рис. 4 показана расчетная область, в которой выполнялся численный расчет нестационарного движения жидкости в момент удара тела о воду. Для удобства восприятия масштаб по оси  $Y$  увеличен (рис. 4, b). Начальные условия и параметры тела аналогичны параметрам, принятым в экспери-

менте. Схема установки и обозначения приведены на рис. 2, a.

На рис. 5 представлены поля скорости воды через каждые 0,2 мс после удара тела о воду. Исходные данные соответствуют эксперименту.

Проанализируем приведенные рисунки.

Предварительно определим период распространения волны по бассейну  $T = 2H/C = 0,616$  мс. Видно, что через 0,2 мс после удара тела о воду (рис. 5, a) в движение приводится примерно половина жидкости, находящейся в бассейне. Глубина проникновения ударной волны (под ударной волной здесь и далее понимается волна сжатия, формирующаяся при ударе) внутрь воды бассейна составляет около 0,3 м ( $1460 \text{ м/с} \cdot 0,00002 \text{ с} = 0,3 \text{ м}$ ). При этом возникает значительное течение жидкости в зазорах между телом и стенками бассейна. Еще через 0,2 мс (рис. 5, b) в отраженной от дна волне скорость движения жидкости обращается в ноль, а скорость воды в падающей волне постепенно увеличивается. Через следующие 0,2 мс (рис. 5, c) отраженная волна достигает торца тела и отражается от него. При этом скорость воды в зазорах между телом и стенками бассейна значительно возрастает. Отраженная волна движется опять ко дну бассейна (рис. 5, d) и видно,

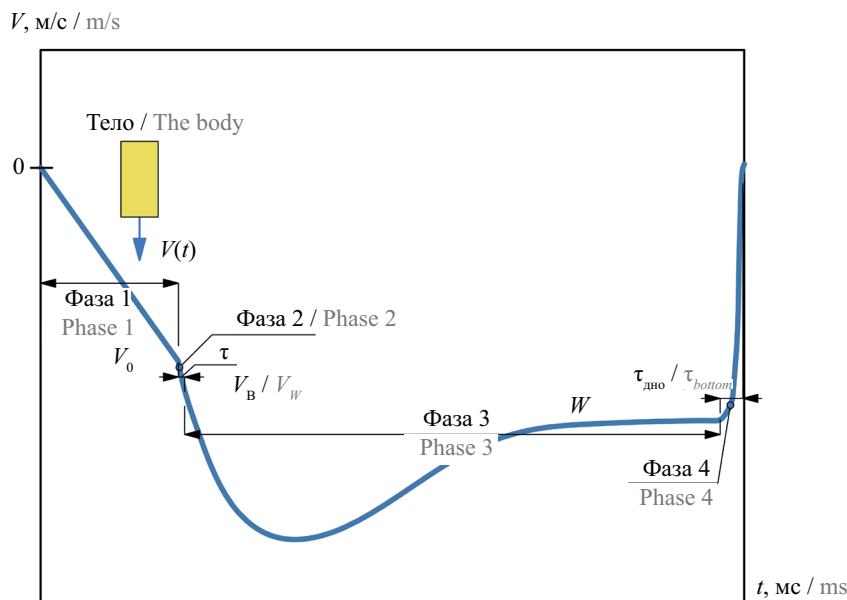


Рис. 3. Общий вид зависимости изменения скорости тела от времени при его падении в бассейн с водой:  $V_0$  — скорость входа тела в воду;  $V_B$  — скорость, обеспечивающая движение присоединенной массы воды;  $W$  — скорость равномерного движения тела в бассейне (гидравлическая крупность)

Fig. 3. General view of the dependence of the change in the velocity of a body on time when it falls into a pool of water:  $V_0$  — velocity of the body entering the water;  $V_B$  — velocity that ensures the movement of the added mass of water;  $W$  — velocity of uniform movement of the body in the pool (hydraulic size)

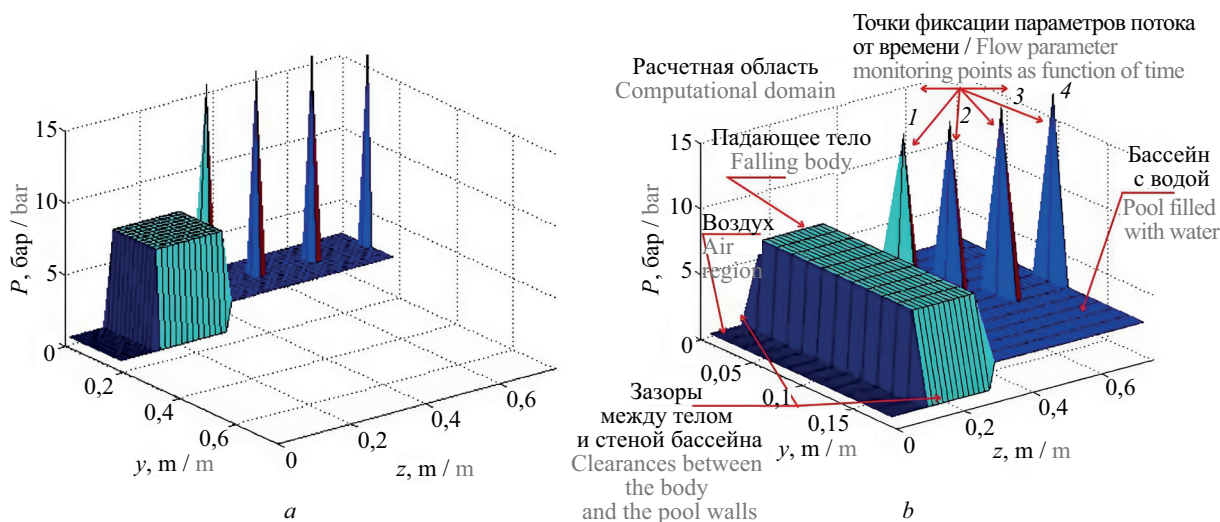


Рис. 4. Расчетная область  
Fig. 4. Computational domain

что жидкость в бассейне приобретает значительную скорость, которая в дальнейшем мало изменяется (рис. 5, e). Наступает период стабилизации движения жидкости, т.е. начинается обычное гидродинамическое течение. Волна сжатия распространяется по бассейну и после этого, но основную роль — приведение в движение жидкости — она уже выполнила и не оказывает существенного влияния на гидродинамические потоки.

Таким образом, из рис. 5 видно, что примерно через 0,8–1,0 мс после удара тела о воду в бассейне устанавливается квазистационарное течение жидкости, т.е. в движение приведена вся жидкость, импульс которой можно охарактеризовать, как импульс присоединенной массы торца тела.

Напомним, что по определению присоединенной массы тела ее численное значение устанавливаются размеры тела, его форма и плотность жидкости.

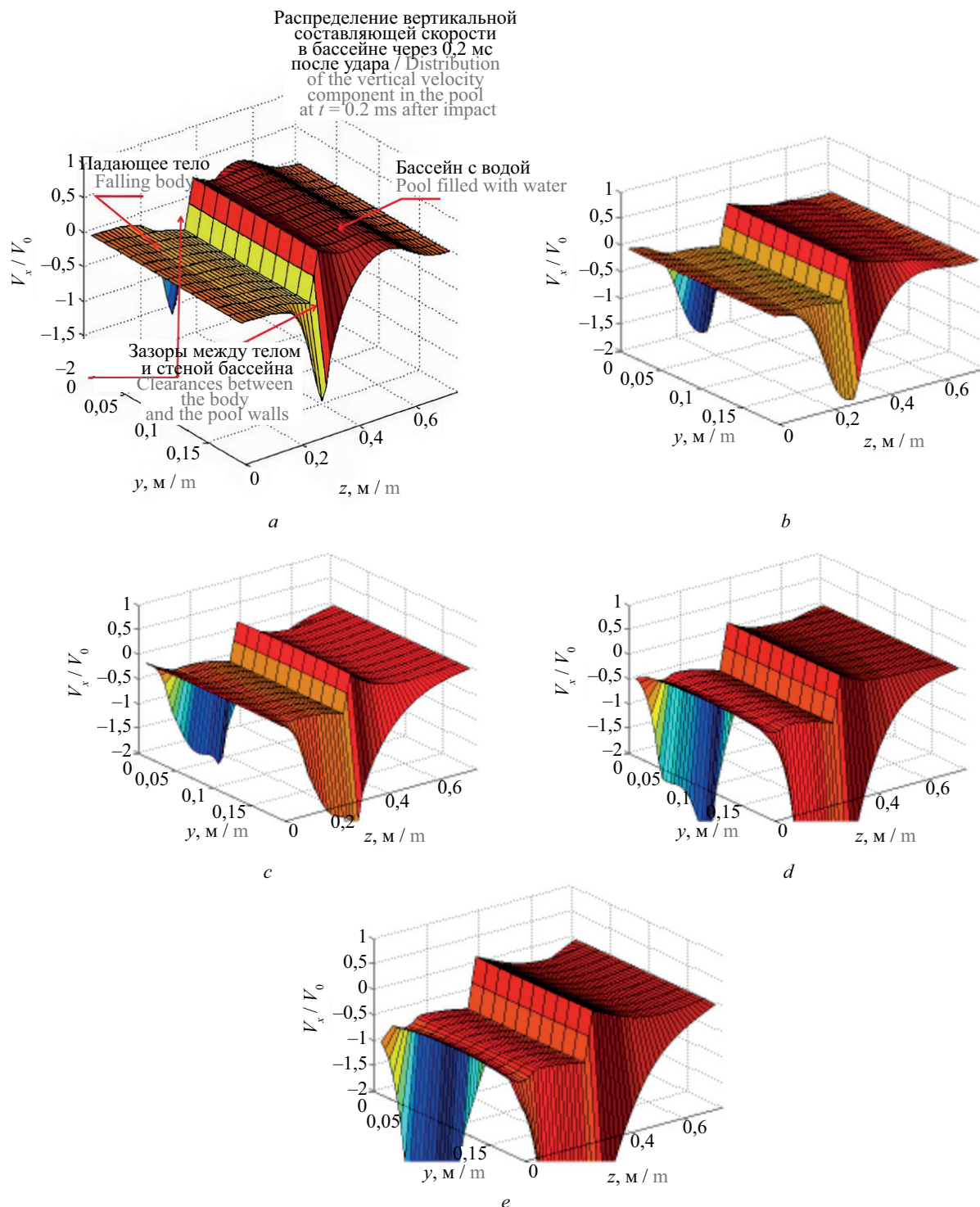


Рис. 5. Поля вертикальной составляющей скорости воды в бассейне через каждые 0,2 мс после удара тела о воду: *a* — через 0,2 мс; *b* — через 0,4 мс; *c* — через 0,6 мс; *d* — через 0,8 мс; *e* — через 1,0 мс

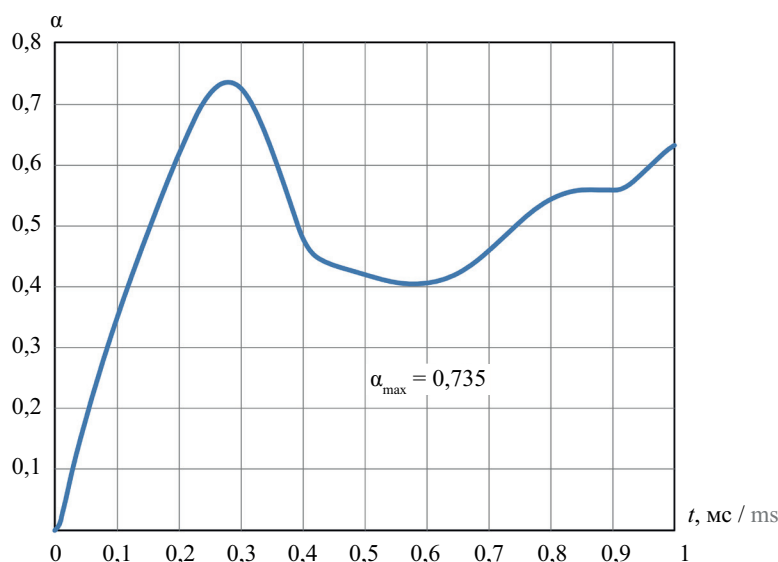
Fig. 5. The vertical velocity fields of the water in the pool are plotted every 0.2 ms after impact: *a* — 0.2 ms; *b* — 0.4 ms; *c* — 0.6 ms; *d* — 0.8 ms; *e* — 1.0 ms

Например, для квадратной пластины с ребром  $D_T$  присоединенная масса  $M_{пр}$  будет равна:

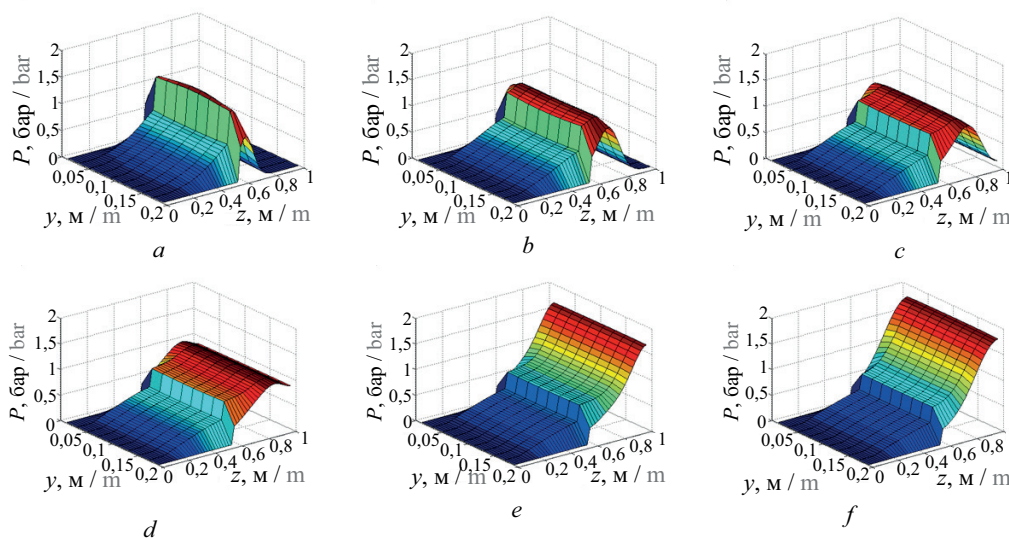
$$M_{пр} = \rho \frac{\pi D_T^2}{4} D_T = \alpha \rho \frac{\pi D_T^2}{4} D_T,$$

где  $\alpha = 1$  [23].

При определении ударных характеристик, связанных с падением тела в жидкость, необходимо рассмотреть изменение присоединенной массы (для принятых граничных условий — падение тела в ограниченный бассейн) во времени. На рис. 6 приведена зависимость коэффициента  $\alpha$  от времени.



**Рис. 6.** Зависимость увеличения коэффициента присоединенной массы  $\alpha$  от времени в момент удара тела о воду  
**Fig. 6.** Dependence of the increase in the coefficient of added mass  $\alpha$  on time at the moment of impact of the body on the water



**Рис. 7.** Мгновенные профили давления. Шаг по времени — 0,2 мс: *a* — поле давления через 0,2 мс после удара; *b* — через 0,4 мс после удара; *c* — через 0,6 мс после удара; *d* — через 0,8 мс после удара; *e* — через 1,0 мс после удара; *f* — через 1,2 мс после удара

**Fig. 7.** Instantaneous pressure profiles. Time step — 0.2 ms: *a* — pressure field 0.2 ms after impact; *b* — 0.4 ms after impact; *c* — 0.6 ms after impact; *d* — 0.8 ms after impact; *e* — 1.0 ms after impact; *f* — 1.2 ms after impact

Данная зависимость получена следующим образом. Во всех расчетных ячейках, занятых водой, для каждого момента времени рассчитывалась вертикальная составляющая импульса. После этого проводилось суммирование по всем расчетным ячейкам и определялся для каждого момента времени импульс всей жидкости. Отношение полученного значения импульса к  $\rho \frac{\pi D_T^2}{4} D_T \cdot V$  дает значение коэффициента  $\alpha$  для данного момента времени.

Рис. 6 позволяет сделать следующие выводы. Через 0,2 мс после удара тела о поверхность жидкости в движение вовлечено около половины массы жидкости в бассейне (пространственное распределение

скорости воды по бассейну, см. рис. 5, *a*). Через 0,3 мс после удара (момент подхода ударной волны к дну бассейна) наблюдается максимум импульса воды, т.е. происходит максимальная отдача импульса тела воде. Через 0,4 мс после удара (см. рис. 5, *b*) жидкость начинает «отдавать» часть импульса дну бассейна, т.е. происходит уменьшение ее импульса, если говорить в терминах присоединенной массы, то уменьшается присоединенная масса. Через 0,6 мс после удара (момент отражения ударной волны от торца тела, см. рис. 5, *c*) импульс воды и присоединенная масса воды начинают расти, т.е. тело начинает снова передавать импульс воде и т.д. То есть начинается колебательный процесс передачи импульса от тела воде и от воды дну

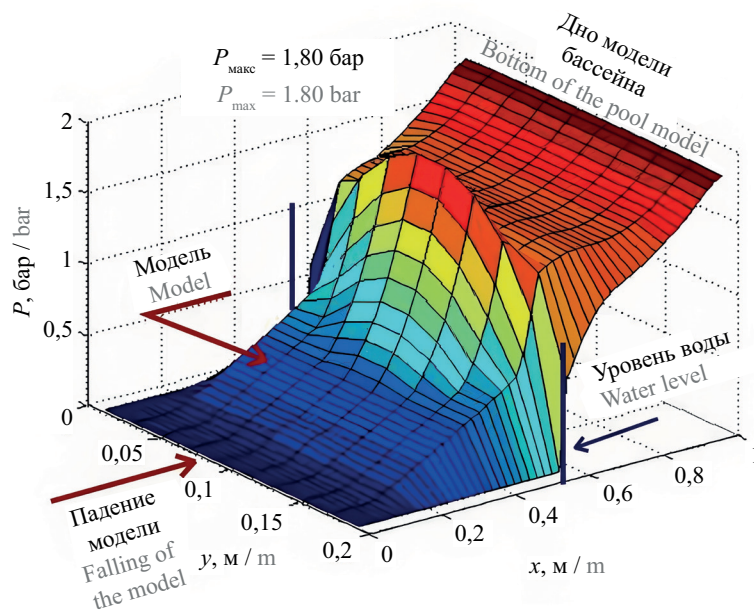


Рис. 8. Поле максимального давления при ударе тела о воду

Fig. 8. Maximum pressure field when a body hits water

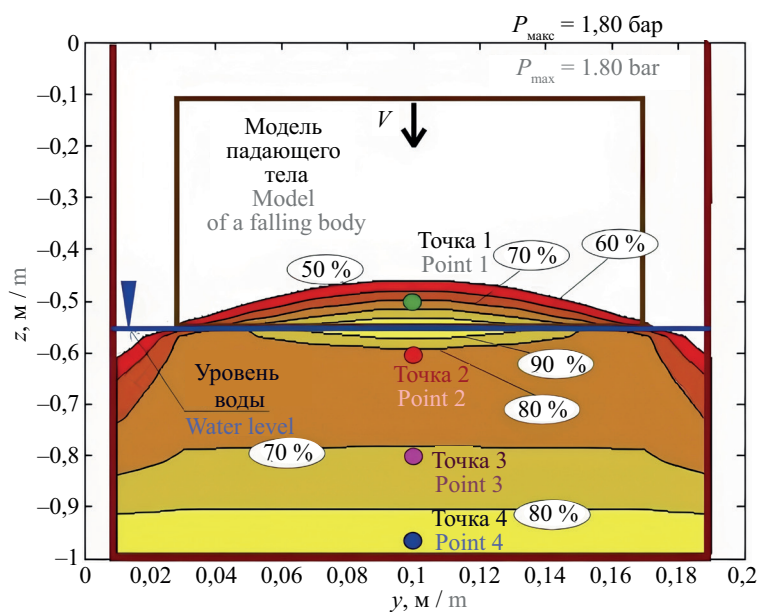


Рис. 9. Изолинии равного давления

Fig. 9. Equal pressure contours

бассейна. В итоге устанавливается квазистационарное течение. При этом максимальный импульс, который потеряет тело за время удара, будет характеризоваться присоединенной массой с численным значением коэффициента  $\alpha = 0,735$ , что меньше аналогичного коэффициента для квадратной пластины.

Рассмотрим результаты расчета распространения давления, создаваемого ударной волной сжатия. Под ударной волной понимается волна, вызванная

ударом, а не принятое в газовой динамике понятие — ударная или сверхзвуковая волна. На рис. 7 приведены мгновенные профили ударного давления для нескольких моментов времени. Шаг по времени на рис. 7 равен 0,2 мс.

Из приведенных расчетов видно, что через 0,2 мс после удара тела о воду (рис. 7, а) внутрь воды распространяется интенсивная волна сжатия с амплитудой около 1,8 бар. Ее распространение по воде

иллюстрирует рис. 7, *b–d*. Примерно через 1 мс ударная волна достигает дна бака и отражается от него, что видно из рис. 7, *e–f*.

Поле максимальных давлений приведено на рис. 8. Поле максимальных давлений строится следующим образом: в каждой расчетной точке (за весь интервал времени) определяется максимальное давление, которое наносится на график рис. 8. Следует отметить, что время реализации максимального давления в разных точках различное.

На рис. 9 представлены изолинии равного относительного давления, построенные на основании рис. 8. Значения поля давления делятся на максимальное давление, которое реализовалось при ударе тела о воду (в данном случае максимальное давление равно 1,80 бар), и строятся линии равного относительного давления: 90 % соответствует  $0,9 \times 1,80$  бар; 80 % —  $0,8 \cdot 1,80$  бар и т.д.

Модельные эксперименты показали, что максимальное ударное давление, фиксируемое на плоском торце тела в момент удара, в несколько раз (от 3 до 4 раз) меньше, чем давление, которое было получено при расчетах.

В ходе экспериментов установлено, что это несоответствие связано с захватом плоским торцом тела порции воздуха, который создает воздушную прослойку и увеличивает время удара. При ударе плоского тела о воду происходит формирование между телом и водой воздушной прослойки, как это изображено на рис. 10.

Наличие воздушного пузыря (воздушной области) под телом приводит к увеличению времени формирования устойчивого гидродинамического течения обтекания водой тела и, соответственно, к уменьшению интенсивности ударной волны.

Поскольку в результате экспериментальных исследований установлено увеличение времени движения тела в жидкости в 3–4 раза (для реальных скоростей падения тел в бассейн), в представленных выше расчетах было принято значение увеличения времени в 3,45 раза.

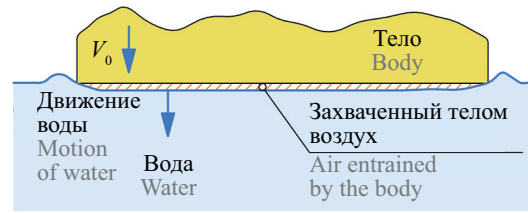


Рис. 10. Иллюстрация момента удара плоского тела о воду и захват телом порции воздуха

Fig. 10. Illustration of the moment when a flat body hits water and the body captures a portion of air

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования показали, что при падении плоских тел в жидкость между плоским дном тела и поверхностью жидкости формируется воздушная прослойка, которая увеличивает время ударного воздействия тела на жидкость. Это приводит к значительному уменьшению интенсивности волны сжатия, распространяющейся по жидкости в результате удара. Например, в ходе экспериментов фиксируемое датчиками максимальное давление удара было в несколько раз (от 3 до 4 раз) меньше, чем расчетная величина динамического давления.

В ходе экспериментов определено, что формирование в момент удара воздушной прослойки между телом и поверхностью жидкости приводит к значительному повышению времени удара, что увеличивает время развития гидродинамических потоков, связанных с формированием так называемой присоединенной массы жидкости. Это приводит к значительному снижению амплитуды ударной волны сжатия.

Кроме того, в результате экспериментальных и численных исследований установлено, что использование понятия присоединенная масса для всего комплекса нестационарных задач не всегда оправдано и правомочно.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бельгова М.А. Экспериментальное исследование плоского удара // Труды ЦНИИМФ. 1969. № 117. С. 15–28.
2. Герасимов С.А. Присоединенная масса и аэродинамическое сопротивление в динамике колебаний // Фундаментальные исследования. 2008. № 7. С. 1–4. EDN JKFPPLT.
3. Григолюк Э.И., Горшков А.Г. Взаимодействие упругих конструкций с жидкостью: удар и погружение. Л. : Судостроение, 1976. 199 с.
4. Ионина М.Ф. Численное исследование задачи об ударе упругих цилиндрических оболочек

- о воду // Вычислительные технологии. 1999. Т. 4. № 3. С. 84–94.
5. Коробкин А.А. Плоская задача о симметричном ударе волной по балке Эйлера // Прикладная механика и техническая физика. 1998. Т. 39. № 5. С. 134–147.
6. Ляхов Г.М., Полякова Н.И. Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения. М. : Недра, 1967. 232 с.
7. Рябченко В.П. Метод интегральных уравнений в плоской и пространственной задачах об ударе пластины о жидкость конечной глубины // Прикладная

механика и техническая физика. 2001. Т. 42. № 4 (248). С. 98–111. EDN ONVVPF.

8. *Тарануха Н.А., Чижиумов С.Д.* Численное моделирование падения на воду тела с гофрированным днищем // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42. № 4 (248). С. 112–118. EDN ONVVPF.

9. *Kubenko V.D.* Impact of blunted bodies on a liquid or elastic medium // International Applied Mechanics. 2004. Vol. 40. Issue 11. Pp. 1185–1225. DOI: 10.1007/s10778-005-0031-6

10. *Palmer R.A., Smith F.T.* Skimming impact of a thin heavy body on a shallow liquid layer // Journal of Fluid Mechanics. 2022. Vol. 940. DOI: 10.1017/jfm.2022.207

11. *Hjelmervik K.B., Tyvand P.A.* Impact of narrow plates on broader liquid bodies // Applied Ocean Research. 2019. Vol. 87. Pp. 247–255. DOI: 10.1016/j.apor.2019.04.002

12. *Korobkin A.* Blunt-body impact on a compressible liquid surface // Journal of Fluid Mechanics. 1992. Vol. 244. Pp. 437–453. DOI: 10.1017/S0022112092003136

13. *Tkacheva L.A.* Impact of a body with a plane bottom on a thin liquid layer at a small angle // Fluid Dynamics. 2013. Vol. 48. Issue 3. Pp. 352–365. DOI: 10.1134/S0015462813030095

14. *Володин Г.Т., Кочергин Д.С.* Разрушение взрывом балочных конструкций в воде // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2021. № 4 (50). С. 3–9. DOI: 10.37972/chgpu.2021.50.4.001. EDN WXQQVA.

15. *Володин Г.Т., Кочергин Д.С.* Импульсная нагрузка на неподвижную преграду при взрыве в воде // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2021. № 3 (49). С. 12–18. DOI: 10.37972/chgpu.2021.49.3.002. EDN QCYGIC.

16. *Сеницкий Ю.Э., Кузьмин Н.Ю.* Колебания днища судового шлюза // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 4 (30). С. 17–24. DOI: 10.5862/MCE.30.3. EDN PDZJWP.

17. *Бочарова О.В., Лебедев М.Г.* Тестирование метода Годунова первого порядка точности на некоторых модельных и практических задачах // Прикладная математика и информатика : тр. факультета ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова. 2016. С. 24–44. EDN XHMDZT.

18. *Комаров А.А.* Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка

последствий их воздействия на здания и сооружения : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2001. 492 с. EDN QDMQZH.

19. *Khabakhpasheva T.I., Korobkin A.A.* Oblique impact of a smooth body on a thin layer of inviscid liquid // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2013. Vol. 469. Issue 2151. P. 20120615. DOI: 10.1098/rspa.2012.0615

20. *Horikawa A., Chiba K., Nishitani K., Ueshima T.* Falling Motion of a Slender Body in Still Liquid // Journal of the Textile Machinery Society of Japan. 1981. Vol. 27. Issue 4. Pp. 107–115. DOI: 10.4188/jte1955.27.107

21. *Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovskii E.N.* Effect of the angle of water entry of a body on the generated wave heights // Fluid Dynamics. 2016. Vol. 51. Issue 2. Pp. 288–298. DOI: 10.1134/s0015462816020162

22. *Tyvand P.A., Solbakken K.M., Hjelmervik K.B.* Incompressible impulsive wall impact of liquid bodies // European Journal of Mechanics — B/Fluids. 2014. Vol. 47. Pp. 202–210. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2014.03.018

23. *Ross S., Hicks P.D.* A comparison of pre-impact gas cushioning and Wagner theory for liquid-solid impacts // Physics of Fluids. 2019. Vol. 31. Issue 4. DOI: 10.1063/1.5086510

24. *Zhu S., Wu T., Bian Y., Chen C., Zhang Y., Li J. et al.* Sustaining Robust Cavities with Slippery Liquid–Liquid Interfaces // Advanced Science. 2022. Vol. 9. Issue 7. DOI: 10.1002/advs.202103568

25. *Логвинович Г.В.* Гидродинамика течений со свободными границами. Киев : Наукова думка, 1969. 208 с.

26. *Комаров А.А., Казеннов В.В.* Падение тела в резервуар с жидкостью и расчет возникающих при этом динамических нагрузок // Вестник МГСУ. 2014. № 5. С. 135–143. EDN SCJUVT.

27. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды. Т. 2. М. : Лань, 2004. 560 с.

28. *Седов Л.И.* Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. М. : Наука, 1966. 448 с.

29. *Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. М. : Наука, 1976. 400 с.

30. *Васильев Е.И., Ионов Г.А.* Двумерная модификация метода Годунова 4-го порядка по пространству и 3-го по времени // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2025. Т. 65. № 10. С. 1720–1734. DOI: 10.31857/S0044466925100089. EDN NPDFGQ.

Поступила в редакцию 5 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 26 декабря 2025 г.

Одобрена для публикации 29 января 2026 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Александр Андреевич Комаров — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1063-8262, РИНЦ ID: 155673, Scopus: 57192380312, ResearcherID: AAC-8725-2022, ORCID: 0000-0003-2764-639X; mgsu-hydraulic@yandex.ru;

Юлия Вадимовна Брянская — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6392-7447, РИНЦ ID: 280769, Scopus: 6505953432, ResearcherID: AAE-7741-2020, ORCID: 0000-0002-6233-3690; mgsu-hydraulic@yandex.ru.

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

1. Bel'gova M.A. Experimental study of flat impact. *Proceedings of the Central Research Institute of Marine Physics*. 1969; 117:15-28. (rus.).
2. Gerasimov S.A. Associated mass and aerodynamic resistance in dynamics of vibrations. *Fundamental Research*. 2008; 7:1-4. EDN JKFPLT. (rus.).
3. Grigolyuk E.I., Gorshkov A.G. *Interaction of elastic structures with liquid: impact and immersion*. Leningrad, Sudostroenie, 1976; 199. (rus.).
4. Ionina M.F. Numerical research of the impact of water on the cylindrical. *Computing Technologies*. 1999; 4(3):84-94. (rus.).
5. Korobkin A.A. Plane problem of symmetric impact of a wave on an Euler beam. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1998; 39(5):134-147. (rus.).
6. Lyakhov G.M., Polyakova N.I. *Waves in dense media and loads on structures*. Moscow, Nedra, 1967; 232. (rus.).
7. Ryabchenko V.P. Method of integral equations in 2d and 3d problems of plate impact on a fluid of finite depth. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001; 42(4):(248):98-111. EDN ONVVPP. (rus.).
8. Taranukha N.A., Chizhiumov S.D. Numerical simulation of the fall of a body with a corrugated bottom on water. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001; 42(4):(248):112-118. EDN ONVVPP. (rus.).
9. Kubenko V.D. Impact of blunted bodies on a liquid or elastic medium. *International Applied Mechanics*. 2004; 40(11):1185-1225. DOI: 10.1007/s10778-005-0031-6
10. Palmer R.A., Smith F.T. Skimming impact of a thin heavy body on a shallow liquid layer. *Journal of Fluid Mechanics*. 2022; 940. DOI: 10.1017/jfm.2022.207
11. Hjelmervik K.B., Tyvand P.A. Impact of narrow plates on broader liquid bodies. *Applied Ocean Research*. 2019; 87:247-255. DOI: 10.1016/j.apor.2019.04.002
12. Korobkin A. Blunt-body impact on a compressible liquid surface. *Journal of Fluid Mechanics*. 1992; 244:437-453. DOI: 10.1017/S0022112092003136
13. Tkacheva L.A. Impact of a body with a plane bottom on a thin liquid layer at a small angle. *Fluid Dynamics*. 2013; 48(3):352-365. DOI: 10.1134/S0015462813030095
14. Volodin G.T., Kochergin D.S. Destruction of beam structures in water by explosion. *Vestnik of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State*. 2021; 4(50):3-9. DOI: 10.37972/chgpu.2021.50.4.001. EDN WXQQVA. (rus.).
15. Volodin G.T., Kochergin D.S. Pulse load on a stationary barrier during an explosion in water. *Vestnik of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State*. 2021; 3(49):12-18. DOI: 10.37972/chgpu.2021.49.3.002. EDN QCYGIC. (rus.).
16. Senitsky Yu.E., Kuzmin N.Yu. Oscillations of the bottom of a shipping lock. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 4(30):17-24. DOI: 10.5862/MCE.30.3. EDN PDZJWP. (rus.).
17. Bocharova O.V., Lebedev M.G. Testing the Godunov method of first order accuracy on some model and practical problems. *Applied Mathematics and Computer Science: Works of the Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics of Lomonosov Moscow State University*. 2016; 24-44. EDN XHMDZT. (rus.).
18. Komarov A.A. *Forecasting loads from emergency deflagration explosions and assessing the consequences of their impact on buildings and structures: thesis of doctor of technical sciences*. Moscow, 2001; 492. EDN QDMQZH. (rus.).
19. Khabakhpasheva T.I., Korobkin A.A. Oblique impact of a smooth body on a thin layer of inviscid liquid. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2013; 469(2151):20120615. DOI: 10.1098/rspa.2012.0615
20. Horikawa A., Chiba K., Nishitani K., Ueshima T. Falling Motion of a Slender Body in Still Liquid. *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*. 1981; 27(4):107-115. DOI: 10.4188/jte1955.27.107
21. Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovskii E.N. Effect of the angle of water entry of a body on the gen-

erated wave heights. *Fluid Dynamics*. 2016; 51(2): 288-298. DOI: 10.1134/s0015462816020162

22. Tyvand P.A., Solbakken K.M., Hjelmervik K.B. Incompressible impulsive wall impact of liquid bodies. *European Journal of Mechanics — B/Fluids*. 2014; 47:202-210. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2014.03.018

23. Ross S., Hicks P.D. A comparison of pre-impact gas cushioning and Wagner theory for liquid-solid impacts. *Physics of Fluids*. 2019; 31(4). DOI: 10.1063/1.5086510

24. Zhu S., Wu T., Bian Y., Chen C., Zhang Y., Li J. et al. Sustaining Robust Cavities with Slippery Liquid-Liquid Interfaces. *Advanced Science*. 2022; 9(7). DOI: 10.1002/advs.202103568

25. Logvinovich G.V. *Hydrodynamics of flows with free boundaries*. Kyiv, Naukova dumka, 1969; 208. (rus.).

26. Komarov A.A., Kazennov V.V. Body drop into a fluid tank and dynamic loads calculation. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 5:135-143. EDN SCJUVT. (rus.).

27. Sedov L.I. *Continuum mechanics*. Vol. 2. Moscow, Lan', 2004; 560. (rus.).

28. Sedov L.I. *Plane problems of hydrodynamics and aerodynamics*. Moscow, Nauka, 1966; 448. (rus.).

29. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., Kraiko A.N., Prokopov G.P. *Numerical solution of multi-dimensional gas dynamics problems*. Moscow, Nauka, 1976; 400. (rus.).

30. Vasiliev E.I., Ionov G.A. Two-dimensional modification of the Godunov method of the 4th order in space and the 3rd order in time. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2025; 65(10):1720-1734. DOI: 10.31857/S0044466925100089. EDN NPDFGQ. (rus.).

Received December 5, 2025.

Adopted in revised form on December 26, 2025.

Approved for publication on January 29, 2026.

**BIOTNOTES:** **Alexandr A. Komarov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 1063-8262, ID RSCI: 155673, Scopus: 57192380312, ResearcherID: AAC-8725-2022, ORCID: 0000-0003-2764-639X; mgsu-hydraulic@yandex.ru;

**Yuliya V. Bryanskaya** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 6392-7447, ID RSCI: 280769, Scopus: 6505953432, ResearcherID: AAE-7741-2020, ORCID: 0000-0002-6233-3690; mgsu-hydraulic@yandex.ru.

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

*The authors declare no conflicts of interest.*

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.059.2

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.435-442

## Прогнозирование динамики изменения продолжительности работ по капитальному ремонту зданий за счет варьирования численности трудовых ресурсов

Елена Анатольевна Король, Анна Геннадьевна Гудкова,  
Рима Сергеевна Петросян, Диана Дмитриевна Антониади

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Ключевым инструментом планирования трудоемкости, продолжительности и стоимости строительных и ремонтно-строительных работ являются документы технологического нормирования, доказательная база которых основана на статистической обработке большого количества экспериментальных натуральных измерений этих параметров на строительной площадке и стоимостных расчетов с учетом варьирования цен в условиях рыночных отношений, а также обобщения опыта практической деятельности строительных организаций.

**Материалы и методы.** При выполнении комплекса строительных или ремонтно-строительных работ важным организационным решением в практической деятельности служит обоснование и выбор последовательности работ, возможное совмещение их во времени и пространстве, определяемые технологическими требованиями. Комплекс работ осуществляется, как правило, коллективом исполнителей — рабочих различных профессий и квалификации, предусматривающим выполнение сложных и ответственных технологических операций наиболее квалифицированными специалистами.

**Результаты.** Нормативными документами регламентирован минимальный состав исполнителей и их квалификационный уровень с целью проведения работ надлежащего качества и более эффективного использования рабочего времени при производстве отдельных видов ремонтно-строительных работ. При организации осуществления комплекса работ поточным методом для обеспечения ритмичности их выполнения количество исполнителей может быть увеличено в соответствии с объемами отдельных видов работ и принятыми размерами захваток и участков.

**Выводы.** Для упрощения процедуры принятия решения обеспечения трудовыми ресурсами комплекса работ по капитальному ремонту объекта при заданных объемах и продолжительности работ разработан инструментарий графической интерпретации формирования рационального количественного и квалификационного состава рабочих, занятых на различных видах работ, объединенных в комплексные бригады.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** комплексная бригада, ремонтно-строительные работы, трудоемкость, стоимость, продолжительность, последовательность работ

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Король Е.А., Гудкова А.Г., Петросян Р.С., Антониади Д.Д. Прогнозирование динамики изменения продолжительности работ по капитальному ремонту зданий за счет варьирования численности трудовых ресурсов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 3. С. 435–442. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.435-442

*Автор, ответственный за переписку:* Рима Сергеевна Петросян, PetrosyanRS@mgsu.ru.

## Prediction of major building repair duration as a function of workforce size

Elena A. Korol, Anna G. Gudkova, Rima S. Petrosyan, Diana D. Antoniadi

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The primary tool for planning labour intensity, duration and cost of construction and repair works are documents of technological regulation. The evidence base of these documents is grounded in statistical processing of a large number of experimental field measurements of these parameters on the construction site, as well as cost calculations considering price fluctuations under market conditions, along with generalization of practical experience from construction organizations.

**Materials and methods.** In carrying out a set of construction or repair-construction works, an important organizational decision in practice involves substantiation and selection of work sequence, possible overlap in time and space determined by technological requirements. Typically, execution of such works is carried out by a team of workers representing different professions and qualifications, where more complex and critical technological operations are performed by highly skilled workers.

**Results.** To ensure proper quality of work and efficient use of working hours when performing individual types of repair-construction works, regulatory documents stipulate minimum staffing levels and qualification standards. When organizing work using flow methods to maintain rhythm, the number of personnel may be increased depending on specific volumes of particular tasks and accepted sizes of sections and areas.

**Conclusions.** For simplifying the procedure of making decisions regarding provision of human resources for a package of capital repair works given specified volumes and durations, a graphic interpretation tool has been developed. This tool helps form rational quantitative and qualitative composition of workers engaged in various activities within integrated teams.

**KEYWORDS:** integrated work crew, construction repair activities, labour input, project cost, work duration, work sequence

**FOR CITATION:** Korol E.A., Gudkova A.G., Petrosyan R.S., Antoniad D.D. Prediction of major building repair duration as a function of workforce size. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(3):435-442. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.435-442 (rus.).

*Corresponding author:* Rima S. Petrosyan, PetrosyanRS@mgsu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

При проведении капитального ремонта многоквартирных домов наиболее распространенными и трудоемкими видами работ являются ремонт кровли, фасадов и инженерных систем [1–5]. Исходными данными для технологического проектирования служат геометрические размеры, объемно-планировочные и конструктивные решения объектов капитального ремонта, на основании которых определяют объемы работ различных видов.

Каждый вид работ выполняется рабочими одной профессии, но, как правило, различной квалификации, объединяемыми в звенья, минимальный количественный состав которых регламентирован нормативными документами. При осуществлении комплекса работ формируются бригады, которые могут объединять рабочих различных профессий и квалификации [6–9]. Проведение работ в определенные

сроки, так же как и возможность сокращения сроков их производства, связано с решением задачи выбора количественного и квалификационного состава рабочих на весь комплекс работ, которые могут производиться последовательно, параллельно, а также совмещенно во времени и пространстве [10–15].

Производство капитального ремонта в построенном здании отличается от возводимого объекта капитального строительства возможностью варьирования последовательности процессов, а также их совмещением. Для решения этих задач эффективно используются методы организационно-технологического моделирования [16, 17].

Наиболее распространенная при проведении капитального ремонта организации труда — с принятием организационных решений по совмещению рабочих профессий в комплексной бригаде [18, 19]. Применяемые методики расчета рационального состава комплексных бригад позволяют выявлять



a



*b*



*c*

**Рис. 1.** Фото фасадов панельного многоквартирного жилого дома серии П-44: *a* — в районе Крылатское г. Москвы; *b* — в 15 мкр. г. Зеленограда г. Москвы; *c* — в 16 мкр. г. Зеленограда г. Москвы

**Fig. 1.** Photo of the facades of a multi-storey residential panel building of series P-44: *a* — in Krylatskoye district, Moscow; *b* — in microdistrict 15, Zelenograd, Moscow; *c* — in microdistrict 16, Zelenograd, Moscow

временные резервы в функционировании отдельных исполнителей и устранять простои за счет совмещения профессий [20, 21]. Однако подобные расчеты трудоемкие. Вместе с тем они имеют единообразный характер, что дает возможность разработать инструментарий графической интерпретации в виде номограмм. Такой подход существенно упрощает процедуры принятия решения обеспечения трудовыми ресурсами выполнения комплекса работ

по капитальному ремонту объекта при заданных объемах и продолжительности работ.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследований осуществлены расчеты количественного состава исполнителей комплекса работ по капитальному ремонту, включая ремонт фасада, кровли и инженерных систем для 40 вариантов объектов, различающихся площадью кровли, фаса-

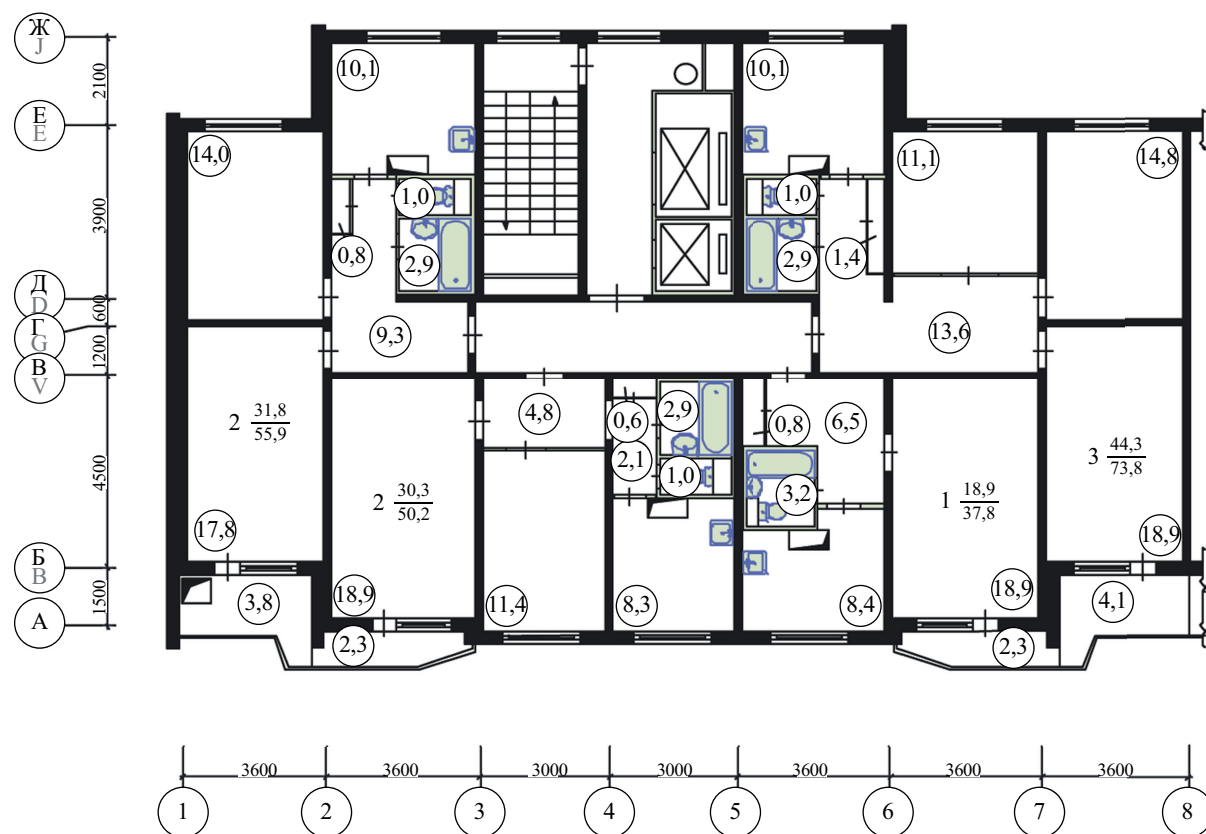


Рис. 2. План типовой секции панельного многоквартирного жилого дома серии П-44

Fig. 2. Layout plan of typical section for a multi-storey residential panel building of series P-44

да и строительного объема зданий и, как следствие, объемами соответствующих ремонтно-строительных работ. В качестве исследуемого объекта принят типовой проект панельного многоквартирного жилого дома (рис. 1), с возможностью варьирования количества секций (от одной до восьми) и этажности здания (9, 12, 17, 20 и 24), план типовой секции панельного многоквартирного жилого дома серии П-44 представлен на рис. 2.

Каждый вид работ может проводиться минимальным количеством исполнителей — звеном, квалификационный уровень которых определен нормами технологического проектирования. Однако для сокращения сроков выполнения отдельных видов работ количество рабочих может быть увеличено в зависимости от принятой технологии, а организация их деятельности осуществляться в виде комплексных бригад, в состав которых включают звенья рабочих, выполняющих полный комплекс работ.

Варьируя возможным максимальным и минимальным количеством рабочих комплексной бригады, найден диапазон расчетных минимальных и максимальных сроков производства комплекса работ по капитальному ремонту с учетом совмещения профессий рабочих при организации их работы в комплексной бригаде (рис. 3), а также использования принципов совмещения технологических процессов во времени и пространстве при поточных

методах организации работ с разделением много-секционного жилого здания на захватки, число которых, как правило, соответствует количеству секций.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Построенная номограмма позволяет по заданным объемам перечисленных ранее ремонтно-строительных работ найти не только требуемое количество исполнителей, чтобы выполнить работы в установленные сроки, но и является инструментом гибкой корректировки продолжительности работ в зависимости от количества исполнителей. Так, например, в соответствии с техническим заданием заказчика известны геометрические параметры здания, по которым определяются объемы работ по капитальному ремонту строительных конструкций и инженерных систем, а также продолжительность выполнения работ. Проведенные построения на номограмме дают возможность последовательно, отсекая заданные объемы работ по ремонту фасада, кровли и инженерных систем, устанавливать продолжительность комплекса работ при организации их выполнения комплексной бригадой минимального состава с учетом совмещения профессий.

В выполненных расчетах площадь кровли изменялась в диапазоне от 350 до 3300 м<sup>2</sup>, фасадов — от 2500 до 24 000 м<sup>2</sup>, строительный объем — от 10 000 до 240 000 м<sup>3</sup>. Продолжительность ком-

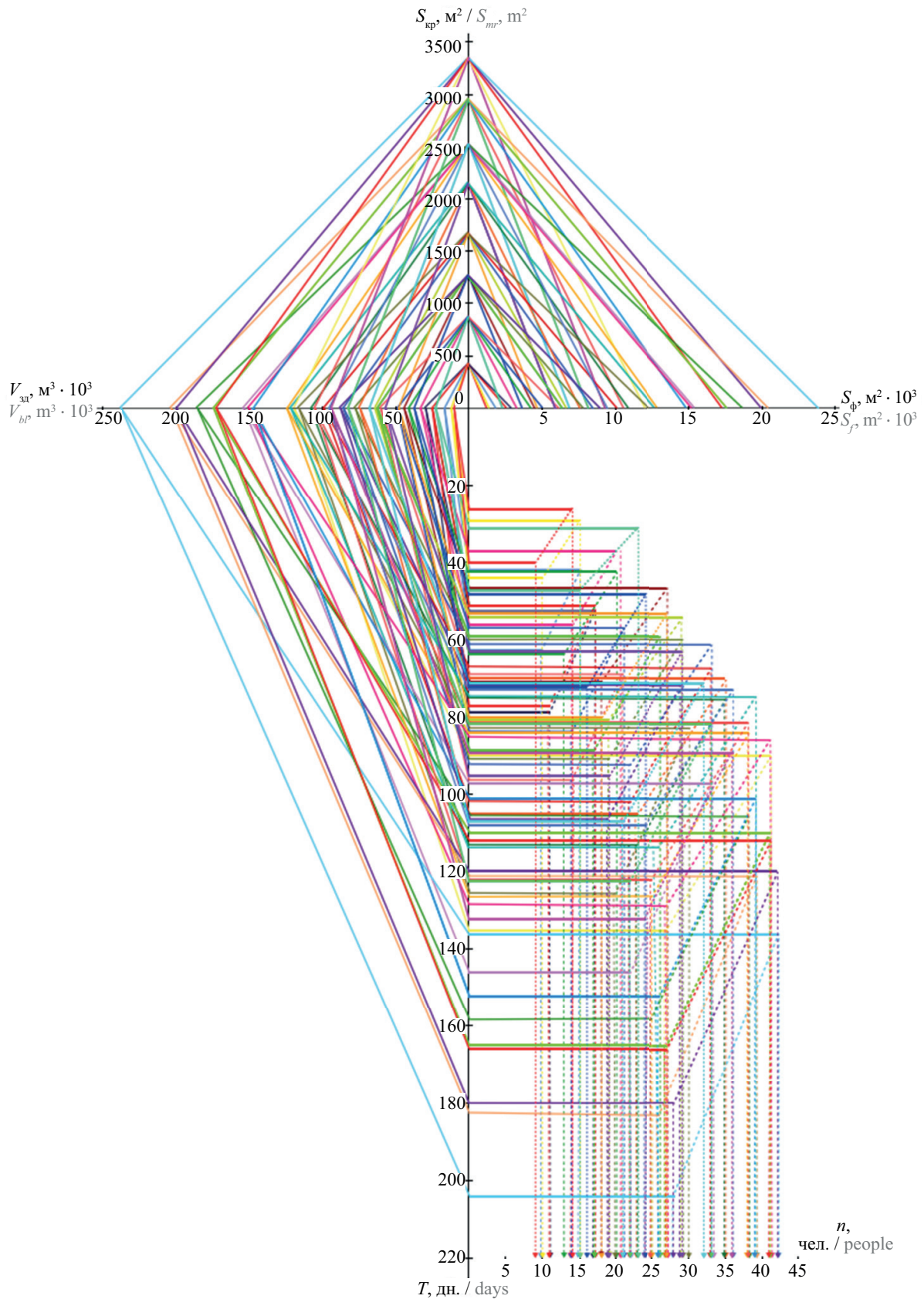


Рис. 3. Номограмма определения численного состава рабочих при различных объемах комплекса работ по капитальному ремонту многоквартирных домов

Fig. 3. Nomogram for determining the number of workers required for various volumes of work involved in the major repair in multi-family buildings

плекса перечисленных ранее работ изменялась от 28 до 202 дней. Минимальную продолжительность осуществления работ обеспечивала комплексная бригада численностью 43 чел. Сокращение рабочих бригады до 8 чел. приводило к значительному увеличению сроков — более 200 дней.

Построенная номограмма позволяет также планировать сокращение продолжительности работ, но за счет необходимого увеличения количества рабочих.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Планирование комплекса работ по капитальному ремонту связано с выбором квалификационного и количественного состава исполнителей — рабочих различных профессий, соответствующих видам

выполняемых работ. Как правило, для сокращения сроков проведения комплекса этих работ их не только совмещают во времени и пространстве в соответствии с выбранной технологией, но и объединяют в бригады, что позволяет наиболее эффективно использовать рабочее время, совмещая ряд профессий и исключая непроизводительные простои. Наиболее существенное влияние на основные технологические параметры, такие как продолжительность, трудоемкость и стоимость, оказывают номенклатура и объемы работ. Это дает возможность применять в научно-исследовательской и практической деятельности разработанный инструментарий — номограммы для варьирования и определения заданных сроков производства работ по капитальному ремонту зданий в зависимости от количественного состава рабочих.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Антониади В.Д., Антониади Д.Д. Пространственно-технологическая структура отдельных технологических процессов при ремонте фасада и кровли // *Строительство и архитектура*. 2023. Т. 11. № 1. С. 2. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-11-1-3-3. EDN PSHQKQ.

2. Грабовый К.П., Король О.А. Анализ тенденций и резервов повышения экономической эффективности энергосберегающих мероприятий в строительном производстве и жилищно-коммунальной сфере // *Инновационно-технические решения при экоустойчивости в строительстве и управлении городским жилищно-коммунальным хозяйством*: сб. мат. VI Междунар. науч.-практ. конф. 2014. С. 65–71. EDN UIRGCL.

3. Грабовый К.П. Особенности проведения строительно-технического исследования объектов строительства, реконструкции, модернизации, технического перевооружения и капитального ремонта, реализованных с использованием целевых бюджетных средств в арбитражном судопроизводстве // *Актуальные проблемы строительной отрасли и образования*: сб. докл. Первой Национ. конф. 2020. С. 1019–1022. EDN INPKYU.

4. Король О.А. Концептуальные основы формирования нормативной базы капитального ремонта общего имущества многоквартирных жилых домов // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2018. № 11 (1011). С. 20–21. EDN YMXPDP.

5. Лapidус А.А., Бидов Т.Х., Хубаев А.О., Эмба С.И. Организационно-технологические решения при реконструкции и капитальном ремонте зданий и сооружений. М.: МГСУ, 2024. 64 с. EDN KTDCBD.

6. Лapidус А.А., Бидов Т.Х., Хубаев А.О. Исследование организационно-технических решений при проведении капитального ремонта многоквартирных жилых домов // *Известия Тульского государ-*

*ственного университета. Технические науки*. 2024. № 2. С. 172–176. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-172-173. EDN UBHFXR.

7. Лapidус А.А., Фатуллаев Р.С., Бидов Т.Х., Николенко Д.М. Анализ стоимости выполненных работ по капитальному ремонту общего имущества в многоквартирных жилых домах в субъектах Российской Федерации // *Строительное производство*. 2023. № 2. С. 3–7. DOI: 10.54950/26585340202323. EDN JMWMYC.

8. Петросян Р.С. Формирование организационно-технологического механизма повышения технологичности производства работ при капитальном ремонте зданий // *Строительство: наука и образование*. 2023. Т. 13. № 1. С. 84–97. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.6. EDN UQDSGZ.

9. Кагазежев А.Ю., Фатуллаев Р.С., Хубаев А.О., Шестерикова Я.В. Анализ основных проблем планирования программ капитального ремонта // *Перспективы науки*. 2022. № 12 (159). С. 81–86. EDN WWCYKN.

10. Маилян Л.Д., Сизен Н.О. Организационно-технологический уровень капитального ремонта зданий и сооружений // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2025. Т. 22. № 1 (101). С. 136–147. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-1-136-147. EDN BPZQQG.

11. Селезнев А.Б., Трусов К.С. Повышение энергоэффективности при капитальном ремонте многоквартирных домов в Российской Федерации: методы и технологии // *Прикладные экономические исследования*. 2024. № 3. С. 50–57. DOI: 10.47576/2949-1908.2024.3.3.005. EDN TOTТАК.

12. Векишин И.А., Куракова О.А. Применение инновационных технологий и материалов при проведении текущего и капитального ремонтов многоквартирных домов // *Экономика и предприниматель-*

ство. 2024. № 9 (170). С. 1297–1302. DOI: 10.34925/EIP.2024.170.9.240. EDN KUZFLG.

13. Wong S.K., Chau K.W., Yau Y., Cheung A.K.C. Property price gradients: the vertical dimension // Journal of Housing and the Built Environment. 2011. Vol. 26. Issue 1. Pp. 33–45. DOI: 10.1007/s10901-010-9203-8. EDN ZGLNTC.

14. Фатуллаев Р.С., Боровкова А.Е., Шароватов Н.А., Логузов В.А. Основные факторы, влияющие на производительность труда при выполнении капитального ремонта в многоквартирных жилых домах // Наука и бизнес: пути развития. 2024. № 7 (157). С. 58–64. EDN JRLPTF.

15. Korol E.A., Petrosyan R.S. Methodological Approaches to the Formation of the Organizational and Technological Mechanism for Improving the Manufacturability of Work during the Overhaul of Buildings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. Issue 3. P. 032057. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032057. EDN SJIOGW.

16. Glass J., Bygballe L.E., Hall D. Transforming construction: the multi-scale challenges of changing and innovating in construction // Construction Management & Economics. 2022. Vol. 40. Issue 11–12. Pp. 855–864. DOI: 10.1080/01446193.2022.2141432. EDN WMTXIL.

17. Roslon J.H., Kulejewski J.E. A hybrid approach for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problem in construction // Open Engineering. 2019. Vol. 9. Issue 1. Pp. 7–13. DOI: 10.1515/eng-2019-0006

18. Jaśkowski P., Biruk S., Krzemiński M. Modeling the problem of sequencing projects in the contractor's portfolio of orders // Archives of Civil Engineering. 2022. Vol. 68. Issue 3. Pp. 307–322. DOI: 10.24425/ace.2022.141887

19. Yin X., Liu H., Chen Y., Al-Hussein M. Building information modelling for off-site construction: Review and future directions // Automation in Construction. 2019. Vol. 101. Pp. 72–91. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.01.010

20. Razali M.F., Haron N.A., Hassim S., Alias A.H., Harun A.N., Abubakar A.S. A Review: Application of Building Information Modelling (BIM) over Building Life Cycles // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 357. Issue 1. P. 012028. DOI: 10.1088/1755-1315/357/1/012028

21. Dou Y., Yan X., Li T., Wang M., Zheng R., Yuan Y. Quality and safety management framework for intelligent construction: Cases study in China // KSCE Journal of Civil Engineering. 2025. Vol. 29. Issue 4. P. 100068. DOI: 10.1016/j.ksej.2024.100068

Поступила в редакцию 28 января 2026 г.

Принята в доработанном виде 3 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 4 февраля 2026 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Елена Анатольевна Король — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; professorskorol@mail.ru;

Анна Геннадьевна Гудкова — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; 1948168@mail.ru;

Рима Сергеевна Петросян — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и организации строительного производства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; PetrosyanRS@mgsu.ru;

Диана Дмитриевна Антониади — аспирант кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; antoniadi23@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Antoniadis V., Antoniadis D. Spatial and technological structure of individual technological processes during repair facades and roofs. *Construction and Architecture*. 2023; 11(1):2. DOI: 10.29039/2308-0191-2022-11-1-3-3. EDN PSHQKQ. (rus.).

2. Grabovoi K.P., Korol O.A. Analysis of trends and reserves for increasing the economic efficiency of energy-saving measures in the construction indus-

try and housing and communal services. *Innovative technical solutions for environmental sustainability in construction and management of urban housing and communal services : collection of materials of the VI International scientific and practical conference*. 2014; 65-71. EDN UIRGCL. (rus.).

3. Grabovy K.P. Features of conducting construction and technical research of construction, reconstruction,

modernization, technical re-equipment and major repairs projects implemented using targeted budgetary funds in arbitration proceedings. *Actual problems of the construction industry and education : collection of reports of the First National Conference*. 2020; 1019-1022. EDN INPKYU. (rus.).

4. Korol O.A. Conceptual foundations of the regulatory framework of capital repairs of common property in apartment houses. *BTS: Bulletin of Construction Technique*. 2018; 11(1011):20-21. EDN YMXDPF. (rus.).

5. Lapidus A.A., Bidov T.Kh., Khubaev A.O., Ekba S.I. *Organizational and technological solutions for reconstruction and major repairs of buildings and structures*. Moscow, MGSU, 2024; 64. EDN KTDCBD. (rus.).

6. Lapidus A.A., Bidov T.Kh., Khubaev A.O. Study of organizational and technical solutions when carrying out major repairs of multiapartment residential buildings. *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*. 2024; 2:172-176. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-2-172-173. EDN UBHFXX. (rus.).

7. Lapidus A.A., Fatullaev R.S., Bidovtembot H., Nikolenko D.M. Analysis of the cost of completed work on capital repairs of common property in apartment buildings in the constituent entities of the Russian Federation. *Construction Production*. 2023; 2:3-7. DOI: 10.54950/26585340202323. EDN JMWMYC. (rus.).

8. Petrosyan R.S. Formation of an organisational and technological mechanism to improve the manufacturability of works in total building renovation. *Construction: Science and Education*. 2023; 13(1):84-97. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.6. EDN UQDSGZ. (rus.).

9. Kagazezhev A.Yu., Fatullaev R.S., Khubaev A.O., Shesterikova Ya.V. The analysis of the main problems in planning of overhaul programs. *Science Prospects*. 2022; 12(159):81-86. EDN WWCYKN. (rus.).

10. Mailyan L.D., Sizen N.O. Organizational and technological level of major repairs of buildings and structures. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22(1):(101):136-147. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-1-136-147. EDN BPZQQG. (rus.).

11. Seleznev A.B., Trusov K.S. Increasing energy efficiency during major repairs of multi-apartment buildings in the Russian Federation: methods and technologies. *Applied Economic Research*. 2024; 3:50-57. DOI: 10.47576/2949-1908.2024.3.3.005. EDN TOTTA. (rus.).

12. Vekshin I.A., Kurakova O.A. The use of innovative technologies and materials during the current and major repairs of apartment buildings. *Economy and Entrepreneurship*. 2024; 9(170):1297-1302. DOI: 10.34925/EIP.2024.170.9.240. EDN KUZFLG. (rus.).

13. Wong S.K., Chau K.W., Yau Y., Cheung A.K.C. Property price gradients: the vertical dimension. *Journal of Housing and the Built Environment*. 2011; 26(1):33-45. DOI: 10.1007/s10901-010-9203-8. EDN ZGLNTC.

14. Fatullaev R.S., Borovkova A.E., Sharovarov N.A., Loguzov V.A. The main factors affecting labor productivity in the performance of capital repairs in apartment buildings. *Science and Business: Ways of Development*. 2024; 7(157):58-64. EDN JRLPTF. (rus.).

15. Korol E.A., Petrosyan R.S. Methodological Approaches to the Formation of the Organizational and Technological Mechanism for Improving the Manufacturability of Work during the Overhaul of Buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753(3):032057. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032057. EDN SJIOGW.

16. Glass J., Bygballe L.E., Hall D. Transforming construction: the multi-scale challenges of changing and innovating in construction. *Construction Management & Economics*. 2022; 40(11-12):855-864. DOI: 10.1080/01446193.2022.2141432. EDN WMTXIL.

17. Roslon J.H., Kulejewski J.E. A hybrid approach for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problem in construction. *Open Engineering*. 2019; 9(1):7-13. DOI: 10.1515/eng-2019-0006

18. Jaśkowski P., Biruk S., Krzemiński M. Modeling the problem of sequencing projects in the contractor's portfolio of orders. *Archives of Civil Engineering*. 2022; 68(3):307-322. DOI: 10.24425/ace.2022.141887

19. Yin X., Liu H., Chen Y., Al-Hussein M. Building information modelling for off-site construction: Review and future directions. *Automation in Construction*. 2019; 101:72-91. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.01.010

20. Razali M.F., Haron N.A., Hassim S., Alias A.H., Harun A.N., Abubakar A.S. A Review: Application of Building Information Modelling (BIM) over Building Life Cycles. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 357(1):012028. DOI: 10.1088/1755-1315/357/1/012028

21. Dou Y., Yan X., Li T., Wang M., Zheng R., Yuan Y. Quality and safety management framework for intelligent construction: Cases study in China. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2025; 29(4):100068. DOI: 10.1016/j.kscej.2024.100068

Received January 28, 2026.

Adopted in revised form on February 3, 2026.

Approved for publication on February 4, 2026.

**BIONOTES:** **Elena A. Korol** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Housing and Public Utilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; professorskorol@mail.ru;

**Anna G. Gudkova** — Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Housing and Public Utilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; 1948168@mail.ru;

**Rima S. Petrosyan** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; PetrosyanRS@mgsu.ru;

**Diana D. Antoniadi** — postgraduate student of the Department of Housing and Public Utilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; antoniadi23@mail.ru.

*Contributions of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare that they have no conflict of interest.*

## Обеспечение внутрикорпоративной ответственности в управлении персоналом строительных компаний (практика реализации в Чешской Республике)

Филип Бушина<sup>1,2</sup>, Юлия Александровна Ковальчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Еланор ICT / Регион Центральной и Восточной Европы; г. Прага, Чешская Республика;*

<sup>2</sup> *Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации (МГИМО МИД России); г. Москва, Российская Федерация*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Строительная отрасль Чешской Республики характеризуется высокой трудоемкостью, значительной дифференциацией заработной платы, проектно-ориентированной организацией труда и устойчивым дефицитом квалифицированной рабочей силы. Указанные особенности существенно усложняют процессы управления персоналом и начисления заработной платы, повышая требования к ответственности работодателя в сфере HR-управления. Целью исследования является анализ взаимосвязей между структурным дефицитом рабочей силы, вариативностью заработной платы и институциональной сложностью HR-процессов, а также эмпирическая оценка их влияния на уровень внутрикорпоративной ответственности в строительных компаниях.

**Материалы и методы.** Эмпирическая база исследования включает отраслевые макроэкономические данные, агрегированные эксплуатационные показатели HR- и payroll-процессов строительных компаний, что позволило выявить устойчивые характеристики управления и обеспечить сопоставимость анализируемых кейсов. Использованы метод анализа главных компонент (PCA), структурное моделирование на основе PLS-SEM для выявления латентных факторов HR-сложности и анализ причинно-следственных связей между исследуемыми переменными.

**Результаты.** Доказано, что рост дифференциации заработной платы и дефицит рабочей силы выступают не только как экономические факторы давления, но и как ключевые детерминанты усложнения внутрикорпоративного управления ответственностью в HR-процессах. Цифровизация HR- и payroll-систем способствует снижению операционных ошибок и повышению прозрачности отдельных процедур, однако не устраняет институциональную сложность управления и не приводит к перераспределению ответственности в сторону технологий. Установлено, что использование цифровых инструментов усиливает требования к качеству управленческих решений, формализации процессов и согласованности действий в управлении персоналом. Внутрикорпоративная ответственность обусловлена как системная управленческая характеристика, определяющая устойчивость HR-управления в условиях высокой кадровой неопределенности и проектной динамики.

**Выводы.** Полученные результаты вносят вклад в развитие управления персоналом в строительстве и обосновывают тезис о том, что цифровизация HR- и payroll-систем не устраняет ответственность работодателя, а трансформирует требования к ее институциональному закреплению.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** строительная компания, управление персоналом, заработная плата, внутрикорпоративная ответственность, HR-процессы, PLS-SEM, латентный фактор

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Бушина Ф., Ковальчук Ю.А. Обеспечение внутрикорпоративной ответственности в управлении персоналом строительных компаний (практика реализации в Чешской Республике) // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 3. С. 444–459. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.444-459

*Автор, ответственный за переписку:* Юлия Александровна Ковальчук, fm-science@inbox.ru.

## Ensuring internal corporate responsibility in personnel management of construction companies (implementation practice in the Czech Republic)

Filip Busina<sup>1,2</sup>, Julia A. Kovalchuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Elanor ICT / Central and Eastern Europe Region; Prague, Czech Republic;*

<sup>2</sup> *Moscow State Institute of International Relations (University) of the Ministry of Foreign Affairs of the Russian Federation (MGIMO University); Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The construction sector of the Czech Republic is characterized by high labour intensity, significant wage differentiation, a project-oriented organization of work, and a persistent shortage of qualified labour. These features substantially complicate personnel management and payroll processes, increasing the requirements for employer responsibility

in the field of HR management. The aim of this study is to analyze the relationships between structural labour shortages, wage variability, and the institutional complexity of HR processes, as well as to empirically assess their impact on the level of internal corporate responsibility in construction companies.

**Materials and methods.** The empirical basis of the study includes industry-level macroeconomic data and aggregated operational indicators of HR and payroll processes in construction companies, which made it possible to identify stable management characteristics and ensure the comparability of the analyzed cases. Principal Component Analysis (PCA) and structural modelling based on PLS-SEM were employed to identify latent factors of HR complexity and to analyze causal relationships between the studied variables.

**Results.** The study demonstrates that increasing wage differentiation and labour shortages act not only as economic pressure factors but also as key determinants of growing complexity in internal corporate responsibility management within HR processes. The digitalization of HR and payroll systems contributes to a reduction in operational errors and enhances the transparency of certain procedures; however, it does not eliminate the institutional complexity of management, nor does it shift responsibility toward technological systems. The findings indicate that the use of digital tools intensifies requirements for the quality of managerial decision-making, process formalization, and coordination in personnel management. Internal corporate responsibility is established as a systemic managerial characteristic that determines the sustainability of HR management under conditions of high workforce uncertainty and project dynamics.

**Conclusions.** The results contribute to the development of personnel management in the construction sector and substantiate the thesis that the digitalization of HR and payroll systems does not eliminate employer responsibility but rather transforms the requirements for its institutionalization.

**KEYWORDS:** construction company, personnel management, payroll, internal corporate responsibility, HR processes, PLS-SEM, latency factor

**FOR CITATION:** Busina F., Kovalchuk Ju.A. Ensuring internal corporate responsibility in personnel management of construction companies (implementation practice in the Czech Republic). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(3):444-459. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.3.444-459 (rus.).

*Corresponding author:* Julia A. Kovalchuk, fm-science@inbox.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Строительная отрасль Чешской Республики является одним из ключевых секторов национальной экономики, вносящих существенный вклад в формирование валового внутреннего продукта и инвестиционной активности страны — в 2024 г. доля строительного сектора в ВВП страны составила 7,75 %, вклад в создание валовой добавленной стоимости — 5,57 % при 7,72 % занятых в экономике страны<sup>1</sup>. Специфика строительных компаний, функционирующих в чешской институциональной среде, заключается в сочетании ограниченных по времени проектов, изменяющегося состава трудовых коллективов и значительной дифференциации профессиональных ролей, что оказывает большое влияние на управление человеческими ресурсами и процессы начисления заработной платы. В последние годы эти характеристики в строительной отрасли Чешской Республики дополнительно усиливаются вследствие структурного дефицита рабочей силы, роста вариативности оплаты труда и возрастающего давления на эффективность и соблюдение сроков реализации строительных проектов.

При интерпретации макроэкономических показателей строительного сектора Чешской Республики

необходимо учитывать институциональные ограничения, связанные с функционированием разрешительных процедур. Несмотря на краткосрочный рост объемов строительной продукции (в 2024 г. отмечено опережение темпов роста в строительном секторе 4,89 % по сравнению с общеэкономическим ростом 4,57 %), официальные статистические данные указывают на рекордно низкое количество выданных строительных разрешений (в 2024 г. произошло снижение на 6,9 %, при этом количество сокращается третий год подряд, достигнув самого низкого уровня с 1999 г.), что свидетельствует о сохраняющейся институциональной нестабильности отрасли. Эта институциональная асимметрия усиливает неопределенность операционной среды и опосредованно повышает нагрузку на кадровые и управленческие процессы строительных компаний.

Современное развитие строительного сектора Чешской Республики показывает, что проблематика кадров в отрасли и заработной платы перестает рассматриваться исключительно как вспомогательная административная функция и приобретает значение ключевого фактора институциональной устойчивости компаний. В условиях критического дефицита рабочей силы, который носит долгосрочный и системный характер, управление персоналом напрямую влияет на способность строительных компаний обеспечивать выполнение контрактных обязательств и поддерживать операционную устойчивость. Дефицит квалифицированных работников, региональная дифференциация заработной платы, рост доли переменных составляющих оплаты труда и проектно-ориентированные схемы оплаты труда существенно усложняют HR-процессы (от англ. Human Resource (HR) — управление че-

<sup>1</sup> Ministerstvo průmyslu a obchodu. Stavebnictví České republiky 2025. Odbor ekonomických analýz. Praha, 2025. 41 s. [Министерство промышленности и торговли Чешской Республики; Союз предпринимателей строительной отрасли Чешской Республики. Состояние и кадровые ограничения строительного сектора Чешской Республики : аналитический обзор. Прага, 2025. 41 с.]. URL: [https://mpo.gov.cz/assets/cz/stavebnictvi-a-suroviny/informace-z-odvetvi/2025/11/Stavebnictvi-2025\\_1.pdf](https://mpo.gov.cz/assets/cz/stavebnictvi-a-suroviny/informace-z-odvetvi/2025/11/Stavebnictvi-2025_1.pdf)

ловеческими ресурсами). В результате управление персоналом трансформируется в институциональный механизм обеспечения внутрикорпоративной ответственности, выходящий за рамки традиционного административного сопровождения. При этом возрастает роль работодателя в обеспечении корректности начисления заработной платы, управления режимами труда, соблюдения трудового законодательства и стабильности трудовых отношений.

Параллельно с указанными структурными изменениями в строительных компаниях активно развивается цифровизация HR- и payroll-процессов (от англ. payroll — система управления заработной платой). Внедрение информационных систем и автоматизированных инструментов часто позиционируется как средство повышения эффективности управления, сокращения административной нагрузки и снижения ошибок. Вместе с тем эмпирические исследования в области цифровизации строительной отрасли указывают, что технологический фактор сам по себе не устраняет институциональные ограничения управления и не приводит к автоматическому перераспределению ответственности [1].

Модельно-ориентированные исследования, выполненные на материале строительной отрасли стран с развитой рыночной экономикой, подтверждают, что цифровые технологии (ЦТ) способны оказывать положительное влияние на производительность и управляемость процессов лишь при условии их институционального принятия и интеграции в существующие управленческие структуры. В противном случае цифровизация сталкивается с барьерами, связанными с распределением ответственности, организационной инерцией и ограниченной адаптацией управленческих практик [2].

Кроме того, в условиях усиления регуляторных требований и ориентации на устойчивое развитие цифровизация в строительстве приобретает комплексный институциональный характер, затрагивая не только производственные, но и кадровые, расчетные и контрольные процессы. Это актуализирует проблему управляемости данных и внутрикорпоративной ответственности в цифровых HR- и payroll-системах, особенно в проектно-ориентированных отраслях [3].

Анализ существующих научных исследований показывает, что при доминировании работ, посвященных производительности, инвестиционной эффективности и управлению строительными проектами, проблематика внутрикорпоративной ответственности в управлении человеческими ресурсами остается недостаточно разработанной. Между тем именно вариативность заработной платы, высокая текучесть персонала и структурный дефицит рабочей силы формируют устойчивую институциональную нагрузку на внутренние механизмы управления и контроля.

Цель настоящей статьи — анализ внутрикорпоративной ответственности в управлении челове-

скими ресурсами строительных компаний Чешской Республики и эмпирическая проверка взаимосвязей между структурным дефицитом рабочей силы, вариативностью заработной платы и институциональной сложностью HR-процессов.

### **Теоретико-институциональный контекст внутрикорпоративной ответственности**

Понятие внутрикорпоративной ответственности в управлении человеческими ресурсами не может быть сведено к индивидуальной ответственности отдельных сотрудников либо к формальному выполнению требований трудового законодательства [4]. В противовес более широко используемому понятию корпоративной социальной ответственности [5], определяющему интеграцию социальных и экологических аспектов в бизнес-деятельность [6] и формирующему элемент доверия в обществе [7], внутрикорпоративная ответственность представляет собой совокупность устойчивых организационных, процессных и управленческих механизмов, посредством которых компания обеспечивает предсказуемость, контролируемость и воспроизводимость HR- и payroll-процессов в условиях изменяющейся внешней и внутренней среды [8]. В данном контексте ответственность выступает как институционально закреплённая характеристика системы управления [9], формируемая под воздействием нормативных, организационных и профессиональных институтов, а не как личное качество отдельных работников или результат применения отдельных технологических решений [10].

Этот подход соответствует положениям институциональной теории, согласно которым поведение организаций и результаты управленческих процессов определяются не только рациональными решениями акторов, но и действием устойчивых норм, правил и рутин, формирующих институциональное поле отрасли [11]. В строительной индустрии такие институциональные ограничения проявляются особенно отчетливо [12] вследствие высокой регламентированности деятельности [13], проектно-ориентированного характера производства [14] и множественности вовлеченных акторов [15].

Дополнительное развитие этого подхода представлено в исследованиях, посвященных строительной сфере как объекту управления [16], так и как феномену институциональных потерь в строительстве. Институциональные нормы, регуляторные требования и устоявшиеся организационные практики могут выступать источником системной неэффективности, воспроизводимой на уровне проектов и организаций независимо от компетенций отдельных участников [17], есть позиции об оценке институциональных результатов при реализации проектов строительства [18]. В этом контексте внутрикорпоративную ответственность следует рассматривать не как реакцию на отдельные ошибки, а как способность организации управлять институ-

ционально обусловленной сложностью и предотвращать накопление системных отклонений в HR и расчетных процессах.

Для строительных компаний данный подход имеет принципиальное значение. Проектно-ориентированная бизнес-деятельность, высокая текучесть персонала, сочетание различных форм занятости и значительная дифференциация заработной платы формируют среду повышенных управленческих и институциональных рисков. В таких условиях ответственность работодателя выходит за рамки формального соблюдения норм и включает способность организации системно управлять сложными кадровыми и расчетными процессами в динамике строительных проектов, сохраняя их управляемость и контролируемость.

При этом с исследовательской позиции принципиально важно разграничивать три взаимосвязанных, но концептуально различных уровня: ответственность, управление и технологии. Ответственность отражает институциональные обязательства компании перед работниками, государственными органами и другими заинтересованными сторонами [7]. Управление включает совокупность решений, процедур и контрольных механизмов, посредством которых эти обязательства реализуются на практике [19]. Технологии, в свою очередь, выступают инструментом поддержки управленческих процессов, но не их заменой и не носителем ответственности [20].

В практике строительных компаний нередко происходит неявное отождествление цифровизации HR- и payroll-процессов с автоматическим снижением роли человеческого фактора и перераспределением ответственности в сторону информационных систем [21]. Однако с институциональной точки зрения такой подход является методологически некорректным, как показывают исследования цифровизации в проектно-ориентированных отраслях [22, 23], технологии не устраняют институциональные противоречия, а лишь изменяют формы их проявления.

Модельно-ориентированные исследования, выполненные на материале строительной отрасли развитых экономик [2, 24], подтверждают, что цифровые технологии оказывают положительное влияние на производительность и управляемость процессов только при условии их институционального принятия и интеграции в существующие управленческие структуры. В противном случае цифровизация сталкивается с барьерами, связанными с распределением ответственности, организационной инерцией и фрагментацией управленческих ролей [25].

Современные исследования в рамках институциональной теории также подчеркивают, что эффективность внедрения новых управленческих практик определяется взаимодействием различных институциональных сил — регуляторных, нормативных и когнитивных [26]. Хотя эти выводы были получе-

ны в контексте «зеленого» устойчивого строительства, они имеют более широкое методологическое значение и подтверждают тезис о том, что цифровизация HR- и payroll-процессов требует институциональной адаптации, а не только технологического обновления.

Существенно обстоятельство, что HR-процессы в строительных компаниях характеризуются высокой институциональной сложностью, обусловленной сочетанием внешних и внутренних факторов. К внешним факторам относятся нормы трудового и налогового законодательства, требования регуляторов, коллективно-договорные практики и жесткие временные рамки реализации строительных проектов. Внутренние факторы включают проектную структуру организации, вариативность профессиональных ролей, региональную дифференциацию заработной платы и значительную долю переменных элементов вознаграждения.

Указанная сложность проявляется не столько в количестве процедур, сколько в их взаимосвязанности и временной динамике. Изменения в кадровом составе проектов, рост текучести персонала или корректировки систем оплаты труда оказывают мультипликативное влияние на другие элементы HR-системы. В этом смысле HR- и payroll-процессы становятся чувствительными индикаторами институциональных дисфункций, накапливающихся в проектно-ориентированной среде [17].

Институциональная теория позволяет интерпретировать эти явления как результат действия устойчивых, но не всегда эффективных норм и рутин, воспроизводимых на уровне отрасли и организаций. Следовательно, внутрикорпоративная ответственность выступает ключевым механизмом, обеспечивающим устойчивость и согласованность управления персоналом в условиях высокой изменчивости входных параметров и ограниченной предсказуемости кадровых потоков.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Эмпирическая база исследования

Формирование массива эмпирических данных осуществлялось с учетом официальных методических подходов к статистическому наблюдению строительной отрасли<sup>2</sup> и рынка труда, применяемых Чешским статистическим управлением<sup>3</sup> и Информационной системой о среднем заработке (ISPV

<sup>2</sup> Český statistický úřad. Krátkodobá statistika stavebnictví — Metodika [Чешское статистическое управление. Строительство в Чешской Республике: методология статистического наблюдения]. URL: [https://csu.gov.cz/stavebnictvi\\_metodika](https://csu.gov.cz/stavebnictvi_metodika)

<sup>3</sup> Český statistický úřad. Stavební produkce [Чешское статистическое управление. Строительная продукция в Чешской Республике: официальные статистические данные]. URL: <https://csu.gov.cz/stavebni-produkce>

от чеш. Informační Systém o Průměrném Výdělku)<sup>4,5</sup>, что обеспечивает институциональную сопоставимость агрегированных HR и зарплатных показателей с макроэкономическими и отраслевыми временными рядами.

В рамках исследования использованы обобщенные результаты внедрения цифровых HR- и payroll-решений в строительных компаниях, включая Skanska, Hochtief и Metrostav. Выбор крупных строительных компаний обусловлен их системной ролью в отрасли, высокой проектной нагрузкой и институциональной сложностью HR- и payroll-процессов, характерной для ведущих участников строительного рынка, реализующих инфраструктурные и инвестиционно емкие проекты.

Используемый массив данных включает:

- агрегированные HR и зарплатные показатели;
- описание структуры HR-процессов и распределение ролей при их реализации;
- обобщенные сведения о характере ошибок, корректировок и рекламаций в расчете заработной платы;
- результаты наблюдений за процессами цифровизации HR-функций при сохранении полной ответственности работодателя.

К числу ключевых агрегированных количественных показателей относятся: общее количество расчетных ведомостей, число исправлений заработной платы, частота ручных вмешательств в автоматизированные процедуры расчета, а также количество обращений и рекламаций работников. Указанные показатели агрегированы за двухлетний период (2024–2025 гг.) и не содержат информации, позволяющей идентифицировать отдельных работников или конкретные управленческие решения.

Агрегированные показатели анализировались в динамике с использованием официальных временных рядов ISPV, что позволило учитывать структурные изменения в уровне и дифференциации заработной платы, а также сопоставлять ожидания (ex ante) и фактические (ex post) результаты в HR- и payroll-процессах.

Данный подход дает возможность анализировать институциональные закономерности внутрикорпоративной ответственности без сведения исследования к анализу частных управленческих кейсов. Использо-

<sup>4</sup> Ministerstvo práce a sociálních věcí ČR. Informační systém o průměrném výdělku za rok 2024 [Министерство труда и социальных дел Чешской Республики. Информационная система о среднем заработке за 2024 год]. URL: <https://www.ispv.cz/cz/Aktuality/Zverejneny-vysledky-ISPV-za-rok-2024.aspx>

<sup>5</sup> Ministerstvo práce a sociálních věcí ČR. Informační systém o průměrném výdělku za první pololetí roku 2025 [Министерство труда и социальных дел Чешской Республики. Информационная система о среднем заработке за первое полугодие 2025 года]. URL: <https://www.ispv.cz/cz/Aktuality/Zverejneny-vysledky-ISPV-za-1-pololetí-2025.aspx>

вание агрегированных и институционально сопоставимых сведений обеспечивает переход от описания отдельных практик к выявлению устойчивых закономерностей функционирования внутрикорпоративной ответственности в проектно-ориентированной строительной среде.

### Организационная архитектура HR-процессов и распределение ответственности

Анализ эмпирических данных показывает, что в строительных компаниях HR- и payroll-процессы реализуются в условиях многоуровневого распределения ответственности между различными организационными ролями. В большинстве проектов внедрения и эксплуатации цифровых HR-систем в процесс были вовлечены следующие категории участников:

- HR-подразделения и специалисты по персоналу;
- бухгалтеры по учету заработной платы;
- линейный менеджмент и руководители подразделений;
- специалисты IT и администраторы систем;
- проектные менеджеры;
- представители высшего руководства;
- сотрудники, использующие HR-порталы и сервисы самообслуживания.

Распределение функций между указанными ролями носит комплементарный характер и не предполагает передачи ответственности за управленческие решения цифровым инструментам. Напротив, внедрение HR- и payroll-систем приводит к формализации зон ответственности, повышая требования к согласованности действий между HR, линейным менеджментом и контроллингом.

Таким образом, внутрикорпоративная ответственность проявляется не в наличии или отсутствии цифровых решений, а в способности организации обеспечить прозрачное и воспроизводимое распределение управленческих функций и контрольных процедур.

### Цифровые HR-инструменты и сохранение ответственности работодателя

Эмпирический анализ практики цифровизации HR-процессов в строительных компаниях подтверждает, что применение различных моделей предоставления программного обеспечения (SaaS<sup>6</sup>, лицензии, On-Premise<sup>7</sup>) и различных пользовательских интерфейсов не приводит к перераспределению ответственности от организации к поставщику технологий.

<sup>6</sup> SaaS (от англ. Software as a Service — программное обеспечение как услуга) — модель облачного предоставления программного обеспечения.

<sup>7</sup> On-Premise (от англ. on-prem — «на месте») означает, что вся серверная часть для работоспособности сервиса находится во внутренней сети организации — на серверах компании, которая использует сервис.

Цифровые HR- и payroll-инструменты выполняют функцию поддержки управленческих процессов, включая:

- консолидацию кадровых и зарплатных данных;
- ускорение документооборота;
- снижение числа рутинных операций;
- повышение прозрачности отдельных процедур.

При этом ответственность за корректность исходных сведений, принятие управленческих решений, соблюдение трудового законодательства и интерпретацию результатов обработки информации сохраняется за уполномоченными должностными лицами компании. Эти эмпирические наблюдения подтверждают тезис о том, что цифровизация усиливает требования к институциональной зрелости управления, но не заменяет ответственность человеческого фактора.

### **Ошибки, корректировки и контроль как индикаторы институциональной зрелости**

В рамках анализа информации о расчете заработной платы и сопутствующих HR-процессах особое внимание уделялось характеру ошибок, последующих корректировок и рекламаций. Полученные результаты свидетельствуют о том, что после внедрения цифровых HR- и payroll-инструментов наблюдалось статистически значимое снижение уровня ошибочности, однако масштаб этого эффекта существенно различался между отдельными строительными компаниями.

Это различие указывает на то, что снижение числа ошибок не является автоматическим следствием цифровизации как таковой. Ключевую роль играют качество исходных данных, степень формализации HR-процессов и вовлеченность ответственных ролей в контроль и верификацию информации. Таким образом, уровень ошибочности и частота ручных корректировок могут рассматриваться как эмпирические индикаторы институциональной зрелости внутрикорпоративной ответственности.

В последующем количественном анализе показатели исправлений заработной платы, частоты ручных вмешательств и количества рекламаций используются в качестве операциональных индикаторов институциональной зрелости и уровня внутрикорпоративной ответственности в HR- и payroll-процессах.

### **Роль HR, линейного менеджмента и контроллинга в цифровой среде**

Эмпирические данные подтверждают, что в условиях цифровизации HR-процессов роль HR-подразделений и контроллинга не снижается, а напротив, приобретает стратегическое значение. HR-специалисты и бухгалтеры по расчету заработной платы выступают носителями ключевых компетенций в части интерпретации сведений и соблюдения нормативных требований, тогда как контроллинг обеспечивает формирование контрольных показателей и мониторинг отклонений.

Линейный менеджмент вовлекается преимущественно на этапах операционной реализации и согласования данных, что подчеркивает необходимость четкого разграничения управленческих и контрольных функций. В совокупности эти наблюдения подтверждают, что эффективное функционирование цифровых HR-систем возможно лишь при активной и институционально закреплённой роли ответственных управленческих подразделений.

### **Методологическая интерпретация эмпирических данных**

Использование агрегированных эмпирических данных позволило сформировать основу для применения продвинутых статистических методов анализа. Выявленные характеристики HR-процессов и распределения ответственности легли в основу операционализации латентных конструкций, отражающих институциональную сложность HR-управления и уровень внутрикорпоративной ответственности.

Для обеспечения сопоставимости компаний различного масштаба применяемые количественные показатели были нормированы на 100 расчетных ведомостей, что позволило использовать их для количественной проверки гипотез с применением факторного анализа PCA (от англ. Principal Component Analysis — метод главных компонент), панельного регрессионного анализа и структурного моделирования PLS-SEM (от англ. Partial Least Squares Structural Equation Modeling — моделирование с использованием структурных уравнений с частичными наименьшими квадратами), что обеспечивает переход от описания практик к объяснению устойчивых институциональных зависимостей.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

### **Ожидания развития HR-процессов и фактическая динамика показателей (2024–2025 гг.)**

На основе ретроспективных макроэкономических данных о строительном секторе Чешской Республики, динамики объема строительных работ (рис. 1) и прогнозов оживления рынка в 2025 г. формировались обоснованные ожидания относительно развития HR-процессов в отрасли. Предполагалось, что стабилизация строительного рынка и рост экономической активности приведут к снижению кадрового давления, уменьшению вариативности заработной платы и повышению управляемости HR- и payroll-процессов, в том числе за счет цифровизации.

Однако анализ фактических данных за 2024–2025 гг. демонстрирует расхождение между ожидаемыми и реализованными эффектами. Несмотря на восстановление объемов строительства и рост стоимости выполненных работ, структурный дефицит рабочей силы сохранился, а в отдельных сегментах отрасли усилился. Одновременно наблюдалось со-

хранение высокой вариативности заработной платы, значительная флуктуация персонала и повышенная нагрузка на HR-подразделения, особенно в проектно-ориентированных строительных компаниях.

Таким образом, фактическая динамика HR-показателей не подтвердила предположение о линейной зависимости между макроэкономическим оживлением и снижением институциональной нагрузки на управление персоналом. Зафиксированное расхождение между ex ante ожиданиями и ex post результатами (табл. 1) обусловило необходимость перехода от преимущественно описательного анализа к объяснительной модели, ориентированной на выявление устойчивых институциональных факторов.

Указанное расхождение подтверждается не только отраслевыми макроэкономическими показателями, но и агрегированными эксплуатационными данными HR- и payroll-систем строительных компаний, отражающими фактическую динамику ошибок, корректировок и управленческих вмешательств в расчете заработной платы в 2024–2025 гг.

Приведенные диапазоны отражают агрегированные и экспертно-оценочные характеристики фактической динамики HR-процессов и не предназначены для статистической экстраполяции; они используются для наглядной фиксации устойчивого расхождения между ожидаемыми (ex ante) и фактическими (ex post) эффектами. Это расхождение, зафиксированное в табл. 1, требует перехода от качественного сопоставления (ex ante/ex post) к операционализации переменных, пригодных для объяснительного моделирования. Для этого необходимо выделить набор эмпирически наблюдаемых индикаторов, которые отражают не отдельные конъюнктурные колебания, а устойчивую институциональную нагрузку на HR и расчетные процессы в строительных компаниях. Таким образом выделены четыре группы показателей (табл. 2):

- 1) характеристики оплаты труда;
- 2) кадровая динамика;
- 3) устойчивость расчета заработной платы и частота корректировок;
- 4) проектная нагрузка на HR-процессы.

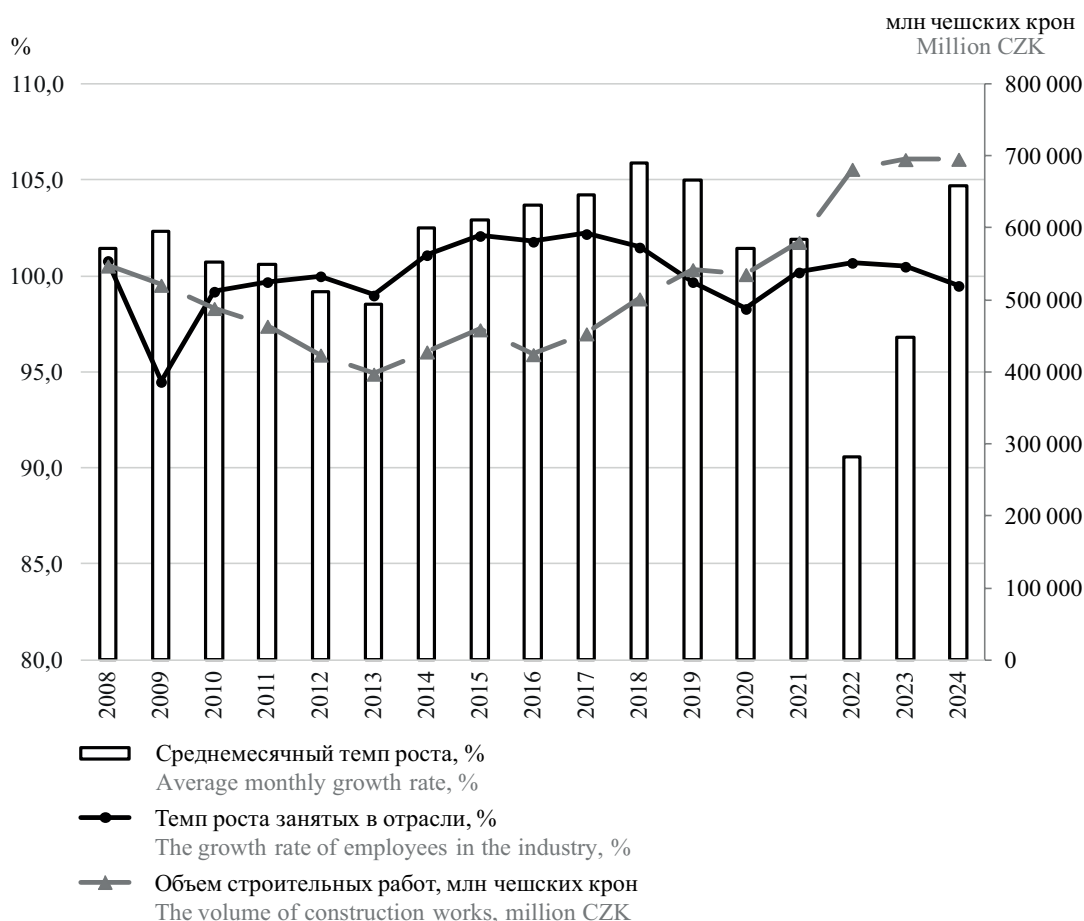


Рис. 1. Динамика показателей строительной отрасли Чешской Республики (составлено авторами на основе данных Чешского статистического управления<sup>8</sup>)

Fig. 1. Dynamics of construction industry indicators of the Czech Republic (compiled by the authors on the basis of data from the Czech Statistical Office<sup>8</sup>)

<sup>8</sup> Český statistický úřad. Stavební produkce [Чешское статистическое управление. Строительная продукция в Чешской Республике: официальные статистические данные]. URL: <https://csu.gov.cz/stavebni-produkce>

**Табл. 1.** Ожидаемые и фактические эффекты развития HR-процессов в строительстве (2024–2025) (составлено автором Ф. Бушиной<sup>9</sup>)

**Table 1.** Expected and actual effects of HR processes in construction (2024–2025) (compiled by the author F. Busina<sup>9</sup>)

Аналитический аспект Analytical Aspect	Ожидание (ex ante) Expectation (ex ante)	Фактическое наблюдение (ex post) Observed Outcome (ex post)	Диапазон экспертной оценки фактического наблюдения Expert Assessment Range of Observed Outcome
Дефицит рабочей силы Labour shortage	Ослабление кадрового давления Easing of workforce pressure	Сохранение/усиление дефицита Persistence/intensification of shortages	Дефицит рабочих специальностей 5–10 % Shortage of blue-collar occupations: 5–10 %
Вариативность заработной платы Wage variability	Снижение и стабилизация Reduction and stabilization	Рост и выраженная региональная дифференциация Increase and pronounced regional differentiation	До 20 %; наибольшая региональная дифференциация наблюдается в Карловарском и Устецком краях, относительно более низкая — в Праге и Южноморавском крае Up to 20 %; the highest regional variation is observed in the Karlovy Vary and Ústí regions, whilst it is relatively lower in Prague and the South Moravian Region
Флуктуация персонала Employee turnover	Стабилизация кадровых потоков Stabilization of personnel flows	Высокая и структурная High and structural	Текущая текучесть персонала рабочих специальностей 8–10 % Turnover of blue-collar workers: 8–10 %
Ошибки в расчетах заработной платы Payroll calculation errors	Существенное сокращение Significant reduction	Снижение, но неоднородное Reduction, but heterogeneous	Сокращение 3–5 % при высокой межфирменной вариативности, в том числе в условиях частичного использования ИИ-инструментов Reduction by 3–5 % with high inter-firm variability, including under conditions of partial use of AI tools
Нагрузка на HR-процессы HR process workload	Оптимизация и снижение сложности Optimization and reduced complexity	Рост институциональной сложности Growth of institutional complexity	Увеличение числа операций и контрольных процедур на 10–15 % в расчете на проект Increase in the number of operations and control procedures by 10–15 % per project

**Табл. 2.** Индикаторы институциональной сложности HR-процессов (составлено автором Ф. Бушиной)

**Table 2.** Indicators of the institutional complexity of HR process (compiled by the author F. Busina)

Группа показателей Indicator Group	Индикатор Indicator	Интерпретация Interpretation
Оплата труда Compensation	Вариативность заработной платы Wage variability	Рост управленческой сложности Increase in managerial complexity
Персонал Workforce	Флуктуация персонала Employee turnover	Нестабильность кадровых потоков Instability of personnel flows
Расчет зарплаты Payroll calculation	Частота корректировок Frequency of adjustments	Интенсивность ручного контроля Intensity of manual control
HR-процессы HR processes	Проектная нагрузка Project workload	Динамичность организационной среды Dynamism of the organizational environment

<sup>9</sup> Составлено автором Ф. Бушиной на основе данных Чешского статистического управления, BusinessInfo.cz, материалов Союза предпринимателей в строительстве Чешской Республики (SPS), аналитического обзора MPO Stavebnictví České republiky 2025 [Министерство промышленности и торговли Чешской Республики, строительство, 2025], а также агрегированных эмпирических данных HR-практики строительных компаний за 2024–2025 гг.

Эмпирическая наполняемость указанных блоков обеспечивается агрегированными эксплуатационными показателями HR- и payroll-систем (частота исправлений заработной платы, объем ручных вмешательств в автоматизированные процедуры, количество рекламаций работников), нормированными на 100 расчетных ведомостей, что позволяет сопоставлять компании различного масштаба и использовать данные в последующем факторном анализе. Указанный набор показателей используется как входная база для последующего выявления латентного фактора институциональной сложности на основе анализа главных компонент.

### Переход от описательной статистики к латентным факторам (РСА)

Для объяснения выявленного расхождения между ожиданиями и фактическими результатами была применена аналитическая процедура идентификации латентных факторов. Использование анализа главных компонент (РСА) позволило перейти от разрозненных показателей рынка труда и HR-практик к интегральной характеристике институциональной сложности HR-управления. Выбор переменных (индикаторы представлены в табл. 2) обусловлен их эмпирической наблюдаемостью и управленческой релевантностью в контексте строительной отрасли. РСА позволил сгруппировать эти показатели в устойчивый латентный фактор, интерпретируемый как институциональная сложность HR-процессов.

Эмпирической основой для проведения РСА послужили агрегированные и нормированные показатели HR- и payroll-систем строительных компаний

Metrostav, Hochtief CZ и Skanska за 2024–2025 гг., включая: частоту исправлений заработной платы (ex post), объем ручных вмешательств в автоматизированные процедуры (ex ante) и количество рекламаций работников, пересчитанные на 100 расчетных ведомостей (табл. 3). Использование нормированных показателей позволило нивелировать эффект масштаба компаний и обеспечить сопоставимость наблюдений при проведении факторного анализа.

Полученный результат указывает на то, что именно институциональная сложность, а не отдельные макроэкономические или отраслевые показатели, определяет устойчивость внутрикорпоративной ответственности. Тем самым подтверждается ограниченность интерпретаций, основанных исключительно на описательной статистике или динамике средних значений.

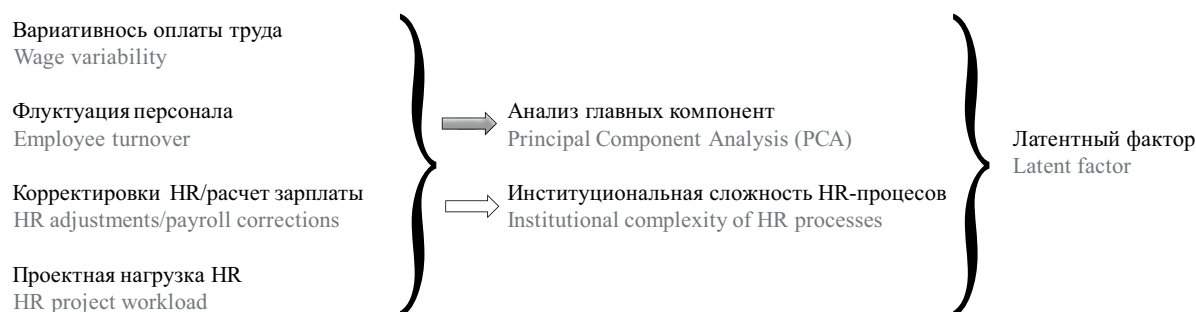
Следует подчеркнуть, что выявленный латентный фактор (рис. 2) отражает структурную (статическую) конфигурацию взаимосвязей между показателями, без учета их временной динамики, что методологически ограничивает возможности интерпретации полученных результатов и обуславливает необходимость дальнейшего анализа с использованием панельного подхода.

Таким образом, применение РСА позволило перейти от разрозненного набора эмпирических индикаторов к обобщенной структурной характеристике институциональной сложности HR-процессов. Однако полученный результат отражает преимущественно статическую конфигурацию взаимосвязей между показателями и не учитывает временную динамику их изменения.

**Табл. 3.** Нормированные HR- и payroll-показатели, использованные в РСА (на 100 расчетных ведомостей, 2024–2025) (источник: агрегированные эксплуатационные данные HR/payroll-систем, 2024–2025 гг.)

**Table 3.** Normalized HR and payroll metrics used in PCA (per 100 payslips, 2024–2025) (source: aggregated operational data from HR/payroll systems, 2024–2025)

Компания Company	Исправления заработной платы Payroll Corrections	Ручные вмешательства Manual Interventions	Рекламации работников Employee Complaints
Metrostav	6,93	2,49	0,82
Hochtief CZ	2,25	7,67	0,28
Skanska	3,24	9,12	0,68



**Рис. 2.** Формирование латентного фактора институциональной сложности HR-процессов (составлено авторами)

**Fig. 2.** Formation of the latent factor of the institutional complexity of HR processes (compiled by the authors)

В условиях строительной отрасли, характеризующейся проектной циклическостью, неравномерной загрузкой персонала и изменяющейся конъюнктурой рынка труда, временной аспект приобретает принципиальное аналитическое значение. В связи с этим следующим этапом анализа стало применение панельного подхода, позволяющего проследить устойчивость выявленного латентного фактора во времени и отделить структурные институциональные эффекты от краткосрочных колебаний HR-показателей в 2024–2025 гг.

### **Панельная интерпретация: динамика 2024–2025 гг.**

Выявление латентного фактора институциональной сложности HR-процессов позволило зафиксировать внутреннюю архитектуру взаимосвязей между ключевыми показателями управления персоналом. Однако для оценки устойчивости данного фактора принципиально важно определить, сохраняется ли выявленная институциональная конфигурация во времени, либо она является результатом краткосрочных колебаний, обусловленных изменениями макроэкономической конъюнктуры.

В этой связи дальнейший анализ был построен с использованием панельного подхода, позволяющего учитывать временную динамику показателей за 2024–2025 гг. и методологически разграничивать структурные институциональные эффекты и временные адаптационные реакции HR-систем строительных компаний. Панельная интерпретация обеспечивает более строгую проверку гипотезы о том, что институциональная сложность HR-управления носит устойчивый характер и не снижается автоматически даже при улучшении макроэкономических условий.

Панельная база сформирована на основе агрегированных эксплуатационных данных HR- и payroll-систем за два последовательных года, что дает возможность фиксировать не внутригодовые колебания, а межвременную устойчивость ключевых управленческих характеристик. Выбор двухлетнего периода обусловлен спецификой строительной отрасли, в которой адаптация HR-процессов к изменениям внешней среды носит инерционный характер и, как правило, не реализуется в рамках одного отчетного цикла.

Результаты панельного анализа показали, что ключевые индикаторы, формирующие латентный фактор институциональной сложности, характеризуются высокой межвременной стабильностью. Несмотря на восстановление объемов строительных работ и рост экономической активности в 2025 г., показатели вариативности заработной платы, флуктуации персонала и нагрузки на HR-процессы не продемонстрировали системного и статистически значимого снижения. В частности, при нормировании на 100 расчетных ведомостей было зафиксировано: исправления заработной платы — 6,8 в 2024 г. и 6,5 в 2025 г. (–4,4 %); ручные управлен-

ческие вмешательства — 9,3 и 9,6 соответственно (+3,2 %); рекламации работников — 4,1 и 4,0 (–2,4 %).

Это свидетельствует о том, что институциональная сложность HR-управления в строительстве формируется как структурное, а не циклическое явление. Эмпирически это проявляется в сохранении сопоставимых уровней нормированных показателей исправлений заработной платы, ручных управленческих вмешательств и рекламаций работников в 2024 и 2025 гг., несмотря на улучшение макроэкономических параметров отрасли.

В результате панельная интерпретация существенно усиливает аргументацию исследования и подтверждает необходимость перехода от описательных и корреляционных подходов к объяснительной модели, учитывающей опосредующую (медиаторную) роль институциональной сложности HR-процессов.

### **Структурное моделирование и опосредующая (медиаторная) роль институциональной сложности (PLS-SEM)**

Предыдущие этапы анализа позволили установить два принципиально важных эмпирических факта: 1) показатели, характеризующие состояние рынка труда и HR-практик в строительстве, формируют устойчивую латентную структуру институциональной сложности HR-процессов; 2) данная структура сохраняется во времени и не демонстрирует статистически значимой тенденции к ослаблению даже в условиях макроэкономического оживления в 2025 г. Вместе с тем ни анализ главных компонент, ни панельный регрессионный подход не позволяют выявить механизм причинно-следственного воздействия внешних условий рынка труда на уровень внутрикорпоративной ответственности.

В этой связи следующим аналитическим шагом стало применение структурного моделирования на основе метода частичных наименьших квадратов (PLS-SEM), ориентированного на анализ опосредованных (медиаторных) причинно-следственных зависимостей с участием латентных переменных. Использование PLS-SEM является методологически оправданным в условиях ограниченного числа наблюдений, агрегированного характера эмпирических данных и необходимости моделирования управленческих конструкций, не поддающихся прямому наблюдению [27].

Эмпирической основой структурного моделирования послужили те же агрегированные и нормированные HR- и payroll-показатели (табл. 3), которые использовались при формировании латентного фактора институциональной сложности в рамках PCA, что обеспечивает методологическую согласованность этапов анализа и исключает произвольное расширение модели.

В построенной модели (рис. 3) институциональная сложность HR-процессов выступает в качестве опосредующей (медиаторной) переменной во вза-



Рис. 3. Концептуальная модель PLS-SEM: ожидания, фактическая динамика и институциональная сложность (составлено авторами)

Fig. 3. The PLS-SEM conceptual model: expectations, actual dynamics, and institutional complexity (compiled by the authors)

имосвязи между условиями рынка труда и уровнем внутрикорпоративной ответственности.

Результаты структурного моделирования показали, что прямое влияние дефицита рабочей силы и вариативности заработной платы на уровень внутрикорпоративной ответственности является ограниченным и статистически менее устойчивым ( $\beta = 0,12-0,18; p > 0,10; R^2 < 0,10$ ). В то же время опосредованное влияние, реализуемое через латентный фактор институциональной сложности HR-процессов, носит устойчивый и статистически значимый характер (косвенный эффект  $\beta = 0,41-0,47; p < 0,01; R^2$  модели = 0,36–0,42). Этот результат указывает на то, что внешние экономические и кадровые условия трансформируются в управленческие риски не напрямую, а через усложнение организационной архитектуры HR-управления.

Тем самым подтверждается, что именно институциональная конфигурация HR-системы определяет чувствительность внутрикорпоративной ответственности к внешним импульсам рынка труда, тогда как сами по себе макроэкономические и кадровые факторы не обладают прямым детерминирующим эффектом.

Иными словами, рост дефицита персонала и дифференциации оплаты труда сам по себе не детерминирует уровень ответственности работодателя. Ключевым механизмом выступает способность или неспособность HR-системы институционально перерабатывать внешние импульсы в управляемые и воспроизводимые процессы. Институциональная сложность в данном контексте выполняет функцию опосредующей (медиаторной) переменной и усилителя управленческих эффектов, определяя, превращается ли давление рынка труда в системную нагрузку на внутрикорпоративную ответственность.

Таким образом, применение PLS-SEM позволило перейти от констатации статистических зависимостей к объяснению причинно-следственных механизмов и подтвердить медирующую роль институциональной сложности HR-процессов. Полученные результаты эмпирически обосновывают тезис о том, что устойчивость внутрикорпоративной ответственности в строительных компаниях определяется не уровнем цифровизации и не краткосрочной рыночной конъюнктурой, а зрелостью институциональной архитектуры управления персоналом.

### Обсуждение результатов: контекст цифровизации, управляемости и пределов автоматизации

Полученные эмпирические результаты дают возможность существенно скорректировать распространенные управленческие ожидания, связанные с цифровизацией HR- и payroll-процессов в строительных компаниях. В ряде практических и прикладных публикаций ЦТ интерпретируются как универсальный инструмент снижения управленческой сложности и перераспределения ответственности в сторону автоматизированных систем. Однако результаты настоящего исследования демонстрируют принципиальную ограниченность подобной трактовки, обусловленную институциональной спецификой управления персоналом в строительстве.

Анализ фактической динамики HR-показателей за 2024–2025 гг. показывает, что внедрение цифровых инструментов действительно сопровождается снижением числа ошибок в расчетах заработной платы и повышением прозрачности отдельных процедур. Вместе с тем данный эффект носит статистически значимый, но институционально неоднородный характер. Масштаб снижения ошибок существенно различается между компаниями, что подтверждает вывод о том, что технологиче-

ский фактор не является самостоятельным детерминантом устойчивой управляемости HR-процессов, а проявляет себя лишь в сочетании с организационными и институциональными условиями.

Это различие находит прямое эмпирическое подтверждение в нормированных показателях исправлений заработной платы и ручных управленческих вмешательств, представленных в табл. 3, где сопоставимые по масштабу компании демонстрируют принципиально различные профили управляемости HR- и payroll-процессов.

Результаты PCA и панельного анализа указывают на устойчивость латентного фактора институциональной сложности HR-процессов, который сохраняется независимо от макроэкономического оживления и уровня цифровизации. Применение PLS-SEM дополнительно подтверждает, что именно институциональная сложность выступает ключевым медиатором между внешними условиями рынка труда и уровнем внутрикорпоративной ответственности. Это означает, что цифровизация оказывает преимущественно операционное воздействие, снижая вероятность ошибок, но не устраняет управленческую нагрузку, связанную с координацией ролей, контролем данных и принятием управленческих решений.

Цифровые HR-системы снижают «стоимость ошибки», но не устраняют необходимость институционального выбора и управленческой интерпретации, что подтверждается сохранением латентного фактора институциональной сложности в панельном измерении 2024–2025 гг.

Особое значение в данном контексте приобретает феномен так называемой «фальшивой объективности» цифровых HR-систем. Автоматизированные инструменты способны формировать иллюзию нейтральности и самодостаточности сведений, что может приводить к заниженной оценке роли человеческого фактора в интерпретации информации и разрешении нестандартных ситуаций. Эмпирические данные подтверждают, что ответственность за кадровые и расчетные решения не переносится на технологию, а напротив, требует более жесткого институционального закрепления управленческих ролей, процедур контроля и механизмов ответственности.

Выявленные различия между *ex ante* управленческими ожиданиями и *ex post* фактическими результатами цифровизации свидетельствуют о том, что автоматизация усиливает требования к качеству управленческих решений, а не снижает их значимость.

С позиции управляемости цифровизация HR-процессов в строительных компаниях должна рассматриваться не как средство замещения управленческих функций, а как инструмент повышения требований к их качеству, согласованности и воспроизводимости. В условиях структурного дефицита рабочей силы и высокой вариативности оплаты труда возрастает значение HR-подразделений, линейного

менеджмента и контроллинга как ключевых носителей институциональной ответственности. Именно эти роли обеспечивают трансформацию внешнего давления рынка труда в управляемые, контролируемые и предсказуемые управленческие процессы.

Результаты настоящего исследования показывают, что различия в уровне внутрикорпоративной ответственности между компаниями объясняются не степенью цифровизации как таковой, а способностью институциональной архитектуры HR-управления интегрировать цифровые инструменты в систему распределения ответственности.

Таким образом, различие между ожидаемыми и фактическими результатами цифровизации HR-процессов объясняется не недостаточной технологической оснащенностью строительных компаний, а пределами институциональной адаптации организационных систем управления. Внутрикорпоративная ответственность формируется как системная управленческая характеристика, определяющая устойчивость HR-управления в условиях высокой кадровой неопределенности и проектной динамики. Цифровые технологии усиливают требования к ответственности работодателя, но не подменяют ее, что имеет принципиальное значение для практики управления персоналом в строительстве.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что внутрикорпоративная ответственность в управлении персоналом строительных компаний Чешской Республики формируется не как побочный эффект цифровизации, а как самостоятельная институциональная характеристика системы управления, определяющая устойчивость и управляемость HR- и payroll-процессов. В условиях структурного дефицита рабочей силы, высокой вариативности заработной платы и проектно-ориентированной организации труда ответственность работодателя приобретает системный, многоуровневый и воспроизводимый характер, выходящий за рамки формального соблюдения нормативных требований.

Полученные результаты позволяют сделать принципиальный вывод о пределах автоматизации HR-управления в строительстве. Цифровизация HR- и payroll-систем способствует снижению операционных ошибок и повышению прозрачности отдельных процедур, однако не устраняет институциональную сложность управления и не приводит к перераспределению ответственности в сторону технологий. Напротив, использование цифровых инструментов усиливает требования к качеству управленческих решений, формализации процессов и согласованности действий между HR-подразделениями, линейным менеджментом и функцией контроллинга.

Научный вклад результатов проведенного исследования заключается в развитии институционального подхода к анализу управления персоналом в строи-

тельной отрасли и эмпирическом обосновании тезиса о том, что внутрикорпоративная ответственность представляет собой латентную управленческую конструкцию, а не производную от уровня цифровизации или технологической зрелости. Тем самым обосновано преодоление упрощенных технологически детерминированных интерпретаций цифровой трансформации HR-функций.

Практическая значимость результатов состоит в возможности их использования при проектировании HR- и payroll-систем, разработке внутренних регламентов и формировании контрольных механизмов в строительных компаниях, функциониру-

ющих в условиях высокой кадровой неопределенности и проектной динамики.

Внутрикорпоративная ответственность в управлении персоналом строительных компаний должна рассматриваться как ключевой фактор институциональной устойчивости, обеспечивающий управляемость HR-процессов в условиях дефицита рабочей силы, проектной динамики и растущей сложности организационной среды. Цифровые технологии в данной системе выступают не заменой управленческих функций, а инструментом, требующим их более четкого, осознанного и системного институционального закрепления.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bajpai A., Misra S.C. Evaluation of success factors to implement digitalization in the construction industry // *Construction Innovation*. 2024. Vol. 24. Issue 4. Pp. 865–891. DOI: 10.1108/CI-02-2022-0042
2. Berlak J., Hafner S., Kuppelwieser V.G. Digitalization's impacts on productivity: a model-based approach and evaluation in Germany's building construction industry // *Production Planning & Control*. 2020. Vol. 31. Issue 4. Pp. 335–345. DOI: 10.1080/09537287.2020.1740815
3. Çetin S., Gruis V., Straub A. Digitalization for a circular economy in the building industry: Multiple-case study of Dutch social housing organizations // *Resources, Conservation & Recycling Advances*. 2022. Vol. 15. P. 200110. DOI: 10.1016/j.rcradv.2022.200110
4. Nachmias S., Mitsakis F., Aravopoulou E., Rees C.J., Kouki A. Line managers' perceptions of diversity management: insights from a social exchange theory perspective // *Employee Relations: The International Journal*. 2022. Vol. 44. Issue 2. Pp. 294–318. DOI: 10.1108/ER-12-2019-0484
5. Bedoya M., Román E., Gutiérrez S., Pérez E., Zapata C., Castro-Gómez J. et al. The impacts of corporate social responsibility on internal organizational processes to create shared value // *Cogent Business & Management*. 2024. Vol. 12. Issue 1. DOI: 10.1080/23311975.2024.2418420
6. Кузин Д.В. Концепции российского корпоративного управления: эволюция и сравнительный анализ // *Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика*. 2024. Т. 59. № 1. С. 3–28. DOI: 10.55959/MSU0130-0105-6-59-1-1. EDN BBDHUW.
7. Yan X., Espinosa-Cristia J.F., Kumari K., Cioca L.I. Relationship between corporate social responsibility, organizational trust, and corporate reputation for sustainable performance // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Issue 14. P. 8737. DOI: 10.3390/su14148737
8. Busina F. *Personnel Management Economisation in the Building Industry*. Saarbrücken : Scholars' Press, 2015. 280 p.
9. Кларо Рамирес П.М.Р. Влияние институциональной среды на корпоративную устойчивость российских компаний // *Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика*. 2025. Т. 60. № 2. С. 178–201. DOI: 10.55959/MSU0130-0105-6-60-2-9. EDN IGMLPS.
10. Risi D., Vigneau L., Bohn S., Wickert C. Institutional theory-based research on corporate social responsibility: Bringing values back in // *International Journal of Management Reviews*. 2023. Vol. 25. Issue 1. Pp. 3–23. DOI: 10.1111/ijmr.12299
11. Mahalingam A., Levitt R.E. Institutional Theory as a Framework for Analyzing Conflicts on Global Projects // *Journal of Construction Engineering and Management*. 2007. Vol. 133. Issue 7. Pp. 517–528. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:7(517)
12. Tunji-Olayeni P., Kajimo-Shakantu K., Ayodele T.O., Babalola O. Promoting construction for sustainability transformation: the perspective of institutional theory // *International Journal of Building Pathology and Adaptation*. 2023. DOI: 10.1108/IJBPA-07-2022-0104
13. Ланидус А.А., Щукин А.Ю. Применение функционально ориентированных систем моделирования при осуществлении строительного контроля // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. № 10. С. 1666–1675. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1666-1675. EDN BUZMCQ.
14. Родин Е.В. Специфика конкуренции и прогноз развития проектной деятельности в строительной отрасли // *Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки*. 2023. Т. 8. № 2 (28). С. 189–196. DOI: 10.21603/2500-3372-2023-8-2-189-196. EDN BOTUHM.
15. Пахомова Ю.А. Предпосылки и перспективы развития стратегических партнерских отношений в строительной отрасли России // *Экономика, предпринимательство и право*. 2024. Т. 14. № 12. С. 7727–7742. DOI: 10.18334/epp.14.12.122222. EDN EWFJOU.
16. Martek I. *International Construction Management Research*. London : Routledge, 2024. DOI: 10.1201/9781003494706

17. Sarhan S., Pasquire C., King A. The concept of institutional waste within the construction industry: a potential theoretical framework // *Lean Construction Journal*. 2017. Pp. 12–24. DOI: 10.60164/a6e0d5b4i
18. Qiu Y., Chen H. A systematic review of the knowledge domain of institutional theory in construction project management // *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2023. Vol. 30. Issue 6. Pp. 2523–2544. DOI: 10.1108/ECAM-08-2021-0754
19. Beusch P., Frisk J.E., Rosén M., Dilla W. Management control for sustainability: Towards integrated systems // *Management Accounting Research*. 2022. Vol. 54. P. 100777. DOI: 10.1016/j.mar.2021.100777
20. Завьялова Е., Соколов Д., Кучеров Д., Лисовская А. Настоящее и будущее цифровых методов управления человеческими ресурсами // *Форсайт*. 2022. Т. 16. № 2. С. 42–51. DOI: 10.17323/2500-2597.2022.2.42.51. EDN USSHZZ.
21. Maliha M.N., Tayeh B.A., Aisheh Y.I.A. Impacts of human resources management strategies and practices on workers performance in construction industry : a review // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2024. Vol. 31. Issue 1. Pp. 20–37. DOI: 10.3846/jcem.2024.20989
22. Lieftink B., Smits A., Lauche K. Dual dynamics: project-based institutional work and subfield differences in the Dutch construction industry // *International Journal of Project Management*. 2019. Vol. 37. Issue 2. Pp. 269–282. DOI: 10.1016/j.ijproman.2018.03.005
23. Степанов А.В., Матвеева М.В., Пешкова Е.С. Цифровизация строительной отрасли: перспективы и вызовы // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2024. Т. 14. № 2 (49). С. 356–366. DOI: 10.21285/2227-2917-2024-2-356-366. EDN SJHHTK.
24. Samuelson O., Stehn L. Digital transformation in construction : a review // *Journal of Information Technology in Construction*. 2023. Vol. 28. Pp. 385–404. DOI: 10.36680/j.itcon.2023.020
25. Ershadi M., Lijaucio F. A framework for digitalizing construction businesses: drivers, barriers and outcomes // *Smart and Sustainable Built Environment*. 2024. Vol. 15. Issue 1. Pp. 120–155. DOI: 10.1108/SASBE-01-2024-0003
26. Tetteh F.K., Kwateng K.O., Obiri-Yeboah H. Understanding green building practices adoption in the construction industry: an extension of institutional theory // *Property Management*. 2025. Vol. 43. Issue 5. Pp. 806–831. DOI: 10.1108/PM-09-2024-0096
27. Chew X., Gatea Atiyah A., Alnoor A., Abbas S., Muhsen Y.R., Bayram G.E. Partial Least Squares Structural Equation Modeling // *Information Systems Engineering and Management*. 2025. Pp. 3–16. DOI: 10.1007/978-3-032-01055-1\_1

Received January 28, 2026.

Adopted in revised form on February 4, 2026.

Approved for publication on February 9, 2026.

**ОБ АВТОРАХ:** **Филип Бушина** — кандидат экономических наук, доктор философии, советник директора по развитию бизнеса в Центральной и Восточной Европе; **Еланор ICT / Регион Центральной и Восточной Европы**; Эланор, а.с., ул. Емница 1138/1, 140 00 г. Прага 4, Чешская Республика; докторант; **Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации (МГИМО МИД России)**; 119454, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 76; РИНЦ ID: 1319572, ORCID: 0009-0001-3848-1271; ResearcherID: POU-0588-2026; filip.busina@elanor.cz;

**Юлия Александровна Ковальчук** — доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры управления активами; **Московский государственный институт международных отношений (университет) Министерства иностранных дел Российской Федерации (МГИМО МИД России)**; 119454, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 76; РИНЦ ID: 345569, Scopus: 57192083635, ResearcherID: M-4754-2016, ORCID: 0000-0002-9959-3090; fm-science@inbox.ru.

*Вклад авторов:*

Бушина Ф. — постановка задачи исследования и конкретизация методологии исследования, формирование и обработка массива эмпирических данных, методологическая интерпретация эмпирических данных, эффекты развития HR-процессов в строительстве, выделение индикаторов институциональной сложности HR-процессов, нормирование HR- и payroll-показателей для метода PCA и структурного моделирования PLS-SEM, формулирование выводов исследования.

Ковальчук Ю.А. — научное руководство, концепция исследования, концептуализация исследования, обзор научных источников и редактирование, статистическая оценка макроэкономических индикаторов, проверка достоверности результатов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Bajpai A., Misra S.C. Evaluation of success factors to implement digitalization in the construction industry. *Construction Innovation*. 2024; 24(4):865-891. DOI: 10.1108/CI-02-2022-0042
2. Berlak J., Hafner S., Kuppelwieser V.G. Digitalization's impacts on productivity: a model-based approach and evaluation in Germany's building construction industry. *Production Planning & Control*. 2020; 31(4):335-345. DOI: 10.1080/09537287.2020.1740815
3. Çetin S., Gruis V., Straub A. Digitalization for a circular economy in the building industry: Multiple-case study of Dutch social housing organizations. *Resources, Conservation & Recycling Advances*. 2022; 15:200110. DOI: 10.1016/j.rcradv.2022.200110
4. Nachmias S., Mitsakis F., Aravopoulou E., Reses C.J., Kouki A. Line managers' perceptions of diversity management: insights from a social exchange theory perspective. *Employee Relations: The International Journal*. 2022; 44(2):294-318. DOI: 10.1108/ER-12-2019-0484
5. Bedoya M., Román E., Gutiérrez S., Pérez E., Zapata C., Castro-Gómez J. et al. The impacts of corporate social responsibility on internal organizational processes to create shared value. *Cogent Business & Management*. 2024; 12(1). DOI: 10.1080/23311975.2024.2418420
6. Kuzin D.V. Russian corporate governance conceptions: evolution and comparative analysis. *Moscow University Economics Bulletin*. 2024; 59(1):3-28. DOI: 10.55959/MSU0130-0105-6-59-1-1. EDN BBDHUW. (rus.).
7. Yan X., Espinosa-Cristia J.F., Kumari K., Cioca L.I. Relationship between corporate social responsibility, organizational trust, and corporate reputation for sustainable performance. *Sustainability*. 2022; 14(14):8737. DOI: 10.3390/su14148737
8. Busina F. *Personnel Management Economisation in the Building Industry*. Saarbrücken, Scholars' Press, 2015; 280.
9. Klaro Ramires P.M.R. The impact of institutional environment on corporate sustainability of Russia's companies. *Moscow University Economics Bulletin*. 2025; 60(2):178-201. DOI: 10.55959/MSU0130-0105-6-60-2-9. EDN IGMLPS. (rus.).
10. Risi D., Vigneau L., Bohn S., Wickert C. Institutional theory-based research on corporate social responsibility: Bringing values back in. *International Journal of Management Reviews*. 2023; 25(1):3-23. DOI: 10.1111/ijmr.12299
11. Mahalingam A., Levitt R.E. Institutional Theory as a Framework for Analyzing Conflicts on Global Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2007; 133(7):517-528. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:7(517)
12. Tunji-Olayeni P., Kajimo-Shakantu K., Ayo-dele T.O., Babalola O. Promoting construction for sustainability transformation: the perspective of institutional theory. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*. 2023. DOI: 10.1108/IJBPA-07-2022-0104
13. Lapidus A.A., Shchukin A.Yu. Application of function-oriented modelling systems in construction control implementation. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(10):1666-1675. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1666-1675. EDN BUZMCQ. (rus.).
14. Rodin E. Project activities in the construction industry: the specifics of competition and the development forecast. *Bulletin of Kemerovo State University. Series: Political, Sociological and Economic sciences*. 2023; 8(2):(28):189-196. DOI: 10.21603/2500-3372-2023-8-2-189-196. EDN BOTUHM. (rus.).
15. Pakhomova Yu.A. Prerequisites and prospects for the development of strategic partnerships in the Russian construction industry. *Journal of Economics, Entrepreneurship and Law*. 2024; 14(12):7727-7742. DOI: 10.18334/epp.14.12.122222. EDN EWFJOU. (rus.).
16. Martek I. *International Construction Management Research*. London, Routledge, 2024. DOI: 10.1201/9781003494706
17. Sarhan S., Pasquire C., King A. The concept of institutional waste within the construction industry: a potential theoretical framework. *Lean Construction Journal*. 2017; 12-24. DOI: 10.60164/a6e0d5b4i
18. Qiu Y., Chen H. A systematic review of the knowledge domain of institutional theory in construction project management. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2023; 30(6):2523-2544. DOI: 10.1108/ECAM-08-2021-0754
19. Beusch P., Frisk J.E., Rosén M., Dilla W. Management control for sustainability: Towards integrated systems. *Management Accounting Research*. 2022; 54:100777. DOI: 10.1016/j.mar.2021.100777
20. Zavyalova E., Sokolov D., Kucherov D., Lisovskaya A. Digitalization of human resource management: present and future. *Foresight and STI Governance*. 2022; 16(2):42-51. DOI: 10.17323/2500-2597.2022.2.42.51. EDN USSHZZ. (rus.).
21. Maliha M.N., Tayeh B.A., Aisheh Y.I.A. Impacts of human resources management strategies and practices on workers performance in construction industry : a review. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2024; 31(1):20-37. DOI: 10.3846/jcem.2024.20989
22. Liefstink B., Smits A., Lauche K. Dual dynamics: project-based institutional work and subfield differences in the Dutch construction industry. *International Journal of Project Management*. 2019; 37(2):269-282. DOI: 10.1016/j.ijproman.2018.03.005
23. Stepanov A.V., Matveeva M.V., Peshkova E.S. Digitalization of the construction industry: prospects and challenges. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Ned-*

*vizhimost*. 2024; 14(2):(49):356-366. DOI: 10.21285/2227-2917-2024-2-356-366. EDN SJHHKT. (rus.).

24. Samuelson O., Stehn L. Digital transformation in construction : a review. *Journal of Information Technology in Construction*. 2023; 28:385-404. DOI: 10.36680/j.itcon.2023.020

25. Ershadi M., Lijauco F. A framework for digitalizing construction businesses: drivers, barriers and outcomes. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2024; 15(1):120-155. DOI: 10.1108/SASBE-01-2024-0003

26. Tetteh F.K., Kwateng K.O., Obiri-Yeboah H. Understanding green building practices adoption in the construction industry: an extension of institutional theory. *Property Management*. 2025; 43(5):806-831. DOI: 10.1108/PM-09-2024-0096

27. Chew X., Gatea Atiyah A., Alnoor A., Abbas S., Muhsen Y.R., Bayram G.E. Partial Least Squares Structural Equation Modeling. *Information Systems Engineering and Management*. 2025; 3-16. DOI: 10.1007/978-3-032-01055-1\_1

Received January 28, 2026.

Adopted in revised form on February 4, 2026.

Approved for publication on February 9, 2026.

**BIOTNOTES:** **Filip Busina** — Candidate of Economic Sciences, Ph.D., Advisor to the Director for Business Development in Central and Eastern Europe; **Elanor ICT / Central and Eastern Europe Region**; Elanor, a.s., Jemnická 1138/1, 140 00 Prague 4, Czech Republic; Doctoral Researcher; **Moscow State Institute of International Relations (University) of the Ministry of Foreign Affairs of the Russian Federation (MGIMO University)**; 76 prospect Vernadskogo, Moscow, 119454, Russian Federation; ID RSCI: 1319572, ORCID: 0009-0001-3848-1271; ResearcherID: POU-0588-2026; filip.busina@elanor.cz;

**Julia A. Kovalchuk** — Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of Asset Management; **Moscow State Institute of International Relations (University) of the Ministry of Foreign Affairs of the Russian Federation (MGIMO University)**; 76 prospect Vernadskogo, Moscow, 119454, Russian Federation; ID RSCI: 345569, Scopus: 57192083635, ResearcherID: M-4754-2016, ORCID: 0000-0002-9959-3090; fm-science@inbox.ru.

*Authors' contributions:*

*Busina F.* — *formulation of the research task and specification of the research methodology, formation and processing of empirical data, methodological interpretation of empirical data, the effects of HR processes in construction, indicators identification of the HR processes institutional complexity, normalization of HR and payroll indicators for the PCA method and structural modeling PLS-SEM, the research conclusions formation.*

*Julia A. Kovalchuk* — *scientific guidance, research concept, research conceptualization, scientific sources review and editing, statistical assessment of macroeconomic indicators, verification of the reliability of research results.*

*The authors declare no conflict of interest.*

# ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

## СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список источников указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

**Имя Отчество Фамилия<sup>1</sup>, Имя Отчество Фамилия<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна

<sup>2</sup> 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](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](http://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 Фамилия<sup>1</sup>, Имя Отчество Фамилия<sup>2</sup>...

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна

<sup>2</sup> 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. Фамилия<sup>1</sup>, И.О. Фамилия<sup>2</sup>... на английском языке

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

<sup>2</sup> 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 приводят ссылки на источники.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

**Оформляется на русском и английском языках.**

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

**Пример оформления:**

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

### REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Оформляются на русском и английском языках.**

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

**Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

*Сведения об авторах* на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в

Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

**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*

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 004525988

КБК

00000000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.  
подписка на январь, февраль, март, апрель,  
май, июнь 2026 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

Итого

3 822

руб.

00

коп.

услуги

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)

7716103391

(ИНН получателя платежа)

032146430000000017300

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 004525988

КБК

00000000000000000000000130

ОКТМО

45365000

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.  
подписка на январь, февраль, март, апрель,  
май, июнь 2026 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика

Адрес

плательщика

Сумма

платы

за

Сумма

платежа

Итого

3 822

руб.

00

коп.

услуги

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 безоплатательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: [podpiska@mgsu.ru](mailto: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](mailto:podpiska@mgsu.ru).

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>



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](mailto: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](mailto:podpiska@mgsu.ru).

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

