

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7

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

# ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 20. Выпуск 7  
2025**

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

Сквозной номер 200

# VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 20. Issue 7  
2025**

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

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

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

## Тематические рубрики

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

<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>	28.07.2025.
<b>Подписан в свет</b>	31.07.2025.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,97. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 202

## Главный редактор

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

### Заместители главного редактора

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

## Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

строительный факультет, Республика Польша

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

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

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

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

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

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

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

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

**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

*Алейникова Юлия Зиновьевна*

**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 Федерального государственного бюджетного учреждения «ЦНИИП Минстроя России» Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства (НИИТИАГ), Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

# VESTNIK <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>	28.07.2025

Distributed by subscription

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

## Editor-in-Chief

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

## Deputy Editor-in-Chief

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

## Editorial Board

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

**Piotr 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*

*Yulia Z. Aleynikova*

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

## Chairman of the Editorial Board

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

## Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Yury A. Tabunschikov**, Moscow Institute of Architecture (State Academy), Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

# СОДЕРЖАНИЕ

## АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

*Т.В. Иванцык*

**Реставрация главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве. Концепция фрагментарных раскрытий на основе материалов историко-архитектурных и натуральных исследований . . . . . 989**

*П.П. Спирин*

**Определение морского пространственного планирования в градостроительной системе Российской Федерации . . . . . 1000**

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

*И.В. Свитлик, Т.А. Белаиш*

**Динамическое гашение колебаний конструкций высотных зданий ствольно-подвесного типа при сейсмических воздействиях . . . . . 1017**

*И.В. Ригель, В.В. Елистратов*

**Оценка несущей способности опорных конструкций арктической ветроэнергетической установки на основе аэросервоупругого моделирования . . . . . 1030**

*А.Б. Шурин, И.В. Зинкевич*

**Оценка жесткости баз внецентренно нагруженных стальных колонн по EN 1993-1-8 . . . . . 1051**

*А.Г. Тамразян, А.В. Алексейцев, Е.С. Мишина*

**Вероятностный критерий оценки живучести железобетонных рам при локализации разрушения . . . . . 1061**

*М.П. Бергер*

**Численное моделирование железобетонных перекрытий из сборных плит по стальным балкам . . . . . 1072**

## ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

*Н.С. Никитина, Д.А. Кравченко, Н.В. Ремизова*

**Сравнительный анализ методов расчетов фундаментов на просадочных грунтах . . . . . 1083**

*Г.В. Орехов, М.К. Скляднев, А.Ф. Зубков*

**Экспериментальная проверка динамических характеристик системы измерения пульсационного давления . . . . . 1095**

## ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*А.Л. Торопов, С.В. Саргсян*

**Энергетическая эффективность электрических котлов автономных индивидуальных систем теплоснабжения . . . . . 1104**

**Требования к оформлению научной статьи . . . . . 1113**

986

# CONTENTS

## ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

*Timur V. Ivantsyk*

**Restoration of the main house of the Musin-Pushkin estate in Moscow. Concept of fragmentary disclosures based on the materials of historical, architectural and field studies . . . . . 989**

*Pavel P. Spirin*

**Determination of marine spatial planning in the urban planning system of the Russian Federation . . . . . 1000**

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

*Ilya V. Svitlik, Tatiana A. Belash*

**Dynamic damping of vibrations of structures of high-rise buildings of trunk-suspension type under seismic effects . . . . . 1017**

*Ivan V. Rigel, Viktor V. Elistratov*

**Support structure strength assessment based on aeroservoelastic modelling of an Arctic wind turbine . . . . . 1030**

*Andrei B. Shuryin, Igor V. Zinkevich*

**Stiffness assessment of bases of off-centre loaded steel columns according to EN 1993-1-8. . . . . 1051**

*Ashot G. Tamrazyan, Anatoly V. Alekseytsev, Elena S. Mishina*

**Probabilistic criterion for assessing the robustness of reinforced concrete frames during fracture localization . . . 1061**

*Maria P. Berger*

**Numerical modelling of concrete hollow-core slabs on steel beams. . . . . 1072**

## HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

*Nadezhda S. Nikitina, Danila A. Kravchenko, Nadezhda V. Remizova*

**Comparative analysis of methods of calculation of foundations on subsidence soils . . . . . 1083**

*Genrikh V. Orekhov, Mikhail K. Sklyadnev, Alexander F. Zubkov*

**Experimental verification of the dynamic characteristics of the pulsation pressure measurement system . . . . . 1095**

## ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

*Alexey L. Toropov, Samvel V. Sargsyan*

**Energy efficiency of electric boilers of autonomous individual heat supply systems . . . . . 1104**

**Requirements for research paper design . . . . . 1113**

987

## ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

## AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

# АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 72.025.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.989-999

## Реставрация главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве. Концепция фрагментарных раскрытий на основе материалов историко-архитектурных и натурных исследований

Тимур Викторович Иванцык

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассматривается главное здание усадьбы Мусиных-Пушкиных на Спартаковской улице в Москве. Статья в некотором роде является продолжением затронутой ранее темы, освещенной в работе «Дом Д.А. Шепелева в составе главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных по материалам историко-архитектурных исследований» (Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 6). В указанной публикации подробно раскрывались история первых этапов формирования главного дома и выявление его первоначального облика. Однако было бы несправедливо не осветить и последующие этапы существования домовладения и его главной постройки, в частности. Цель работы — рассмотрение раскрытого предшествующим исследованием первоначального «барочного» объема в контексте более поздних, в том числе и ценных напластований. И, как следствие, формирование концепции реставрации столь сложной многосоставной постройки.

**Материалы и методы.** Использован сравнительно-исторический метод, позволивший рассмотреть материалы исследования в кругу стилистически и типологически близких примеров. Также проанализированы примеры реставрационных работ прошлых лет, примененные в отношении аналогичных многосоставных построек с богатой строительной историей. Произведен анализ примененных на данных постройках методов реставрации и сохранения более древних фрагментов.

**Результаты.** Выявлена строительная периодизация памятника, датирована существующая объемно-планировочная структура, обнаружены и изучены первоначальные элементы постройки и выделены более поздние напластования. Все это позволило предложить проект реставрации главного дома усадьбы с выполнением архитектурных раскрытий более древних участков.

**Выводы.** Предложенный проект реставрации является результатом комплексных исследований и дает возможность выразить исторический облик здания с раскрытием более ранних его объемов. Так, главный дом усадьбы обогатит фактуру и украсит историческое пространство одного из интереснейших усадебных ансамблей Москвы.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** усадебный комплекс на Разгуляе, усадьба Мусиных-Пушкиных в Москве, Мусины-Пушкины, дом Д.А. Шепелева, М.Ф. Казаков, классицизм, барокко, Спартаковская улица

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Иванцык Т.В. Реставрация главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве. Концепция фрагментарных раскрытий на основе материалов историко-архитектурных и натурных исследований // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 989–999. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.989-999

Автор, ответственный за переписку: Тимур Викторович Иванцык, timurahc@yandex.ru.

## Restoration of the main house of the Musin-Pushkin estate in Moscow. Concept of fragmentary disclosures based on the materials of historical, architectural and field studies

Timur V. Ivantsyk

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The paper concentrates on a main building of the Musin-Pushkin estate in Spartakovskaya Street in Moscow, and in some way is a continuation of the previously touched upon topic, covered in the work “Shepelev’s house in the main house of the Musin-Pushkin Estate in Moscow based on historical, architectural and field studies”, published in the journal Vestnik MGSU. 2023. Vol. 18. Issue 6. This paper detailed the history of the first stages of the formation of the main house and revealed its original appearance. However, it would be unfair not to cover the subsequent stages of the existence

of the homestead and its main building in particular. In this regard, the need to write this work arose. The purpose of this paper is to examine the original "Baroque" volume revealed by the previous study in the context of later, including valuable, layers, and, as a consequence, to formulate a restoration concept of such a complex multi-component building.

**Materials and methods.** The comparative-historical method was used as a research method, which allowed us to examine the research materials in a circle of stylistically and typologically similar examples. Examples of restoration work from previous years, applied to similar multi-component buildings with a rich construction history, were also considered. An analysis of the methods of restoration and preservation of more ancient fragments applied to these buildings was conducted.

**Results.** As a result of the conducted research, the construction periodization of the monument was revealed, the existing volumetric-planning structure was dated, the original elements of the building were discovered and studied, and later stratifications were identified. All this made it possible to propose a restoration project for the main house of the estate with the implementation of architectural revelations of more ancient sections.

**Conclusions.** The proposed restoration project is the result of comprehensive studies and allows to express the historical appearance of the building with the disclosure of its earlier volumes. Thus, the main house of the estate will enrich the texture and decorate the historical space of one of the most interesting estate ensembles in Moscow.

**KEYWORDS:** manor complex on Razgulay, Musin-Pushkin Estate in Moscow, Musini-Pushkini, D.A. Shepelev's house, M.F. Kazakov, classicism, baroque, Spartakovskaya st.

**FOR CITATION:** Ivantsyk T.V. Restoration of the main house of the Musin-Pushkin estate in Moscow. Concept of fragmentary disclosures based on the materials of historical, architectural and field studies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):989-999. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.989-999 (rus.).

*Corresponding author:* Timur V. Ivantsyk, timurahc@yandex.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья посвящена главному зданию усадьбы Мусиных-Пушкиных на Спартаковской улице в Москве и в некотором роде служит продолжением затронутой ранее темы, освещенной в работе «Дом Д.А. Шепелева в составе главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных по материалам историко-архитектурных исследований». Являясь памятником архитектуры, созданным в середине XVIII в. [1], здание включило в свой состав объемы различных строительных эпох и архитектурных стилей. Согласно проведенным исследованиям, основой для главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных, созданного на рубеже XVIII–XIX вв., послужил дом обер-гофмейстера и генерал-аншефа Д.А. Шепелева, построенный в середине XVIII столетия и ставший образцом архитектуры эпохи барокко (рис. 1) [2].

Однако, рассматривая столь сложную, много-составную постройку, было бы несправедливо упустить более поздние периоды формирования памятника, в связи с чем и возникла потребность в написании данной работы. Особое внимание стоит уделить последующим периодам существования усадьбы, начавшимся с перестройки дома Шепелева Мусиными-Пушкиными в начале XIX в. [3]. Исследуя раскрытый предшествующим материалом первоначальный объем здания, в контексте более поздних, в том числе и ценных, напластований предпримем попытку предложить проект реставрации сложившегося к сегодняшнему дню (рис. 2). А прежде обратимся к истории главного дома и рассмотрим все этапы его существования вплоть до настоящего времени.

Усадебный ансамбль на Разгуляе появляется в начале XIX столетия, и связано это событие с именем известного ученого и коллекционера



**Рис. 1.** Дом Д.А. Шепелева, существовавший на месте главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных на Спартаковской (Елоховской) улице в Москве: *a* — северный фасад; *b* — восточный фасад. Графическая реконструкция на I строительный период (середина XVIII в.). Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

**Fig. 1.** The D.A. Shepelev's house, which was at the same place, where the main house of the Musin-Pushkin estate in Spartakovskaya (Elohovskaya) st. in Moscow is nowadays: *a* — the northern facade; *b* — the eastern facade. Graphical reconstruction according to 1st construction period (middle XVIII c.). Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU



**Рис. 2.** Главный дом усадьбы Мусиных-Пушкиных на Спартаковской улице в Москве. Вид главного (западного) фасада с площади. Существующее состояние. Фото 2021 г.

**Fig. 2.** The main house of the Musin-Pushkin Estate in Spartakovskaya Street in Moscow. View of the main (western) facade from the square. Existing condition. Photo, 2021

Алексея Ивановича Мусина-Пушкина. Автором комплекса, по мнению исследователей, принято считать М.Ф. Казакова или кого-то из зодчих «его круга» [4]. И если главное здание усадьбы стало плодом перестройки и имеет в своей структуре бо-

лее раннее сооружение, то остальные постройки ансамбля были возведены вновь на месте деревянной хозяйственной застройки. К таким сооружениям можно отнести четыре флигеля (северный [5], южный, восточный [6] и надворный) и ограду [7], оформлявшую домовладение как со стороны улиц, так и с края, обращенного в парк.

Дошедшая до настоящего времени классицистическая постройка создана в первом десятилетии XIX в., что подтверждает план, датируемый 1802 или 1804 г. [8]. Но случившийся вследствие войны 1812 г. пожар нанес некоторый урон каменным объемам, в связи с чем их собирались «поправить» и устроить на этих зданиях кровлю [9]. Обновлением усадьбы в 1813 г. занималась жена А.И. Мусина-Пушкина Екатерина Алексеевна, благодаря стараниям которой усадебный комплекс был отремонтирован, о чем свидетельствует план 1824 г., фиксирующий на территории участка каменную застройку (рис. 3) [10]. После смерти Екатерины Алексеевны в 1829 г. наследники продают домовладение Московскому учебному округу для открытия в нем гимназии.

Перепрофилированием главного дома под учебное заведение занялся строительный комитет при Московском университете. На эти работы было ас-



**Рис. 3.** Москва. Главный дом на плане «дому графини Екатерины Алексеевны Мусиной Пушкиной, состоящему Басманной части 3-го квартала под № прежним 312-м, а ныне 297-м». 5 февраля 1824 г. ЦГА Москвы. Ф. Т-1. Оп. 2. Д. 173 (437/291; 2)

**Fig. 3.** Moscow. The main house at “The plan of the house of Countess Ekaterina Alekseevna Musina Pushkina located on Basmannaya part of the 3rd quarter under the former number of 312th, and now 297th”. February 5, 1824 y. Central State Archive of Moscow. Fund T-1. L. 2 File 173 (437/291; 2)

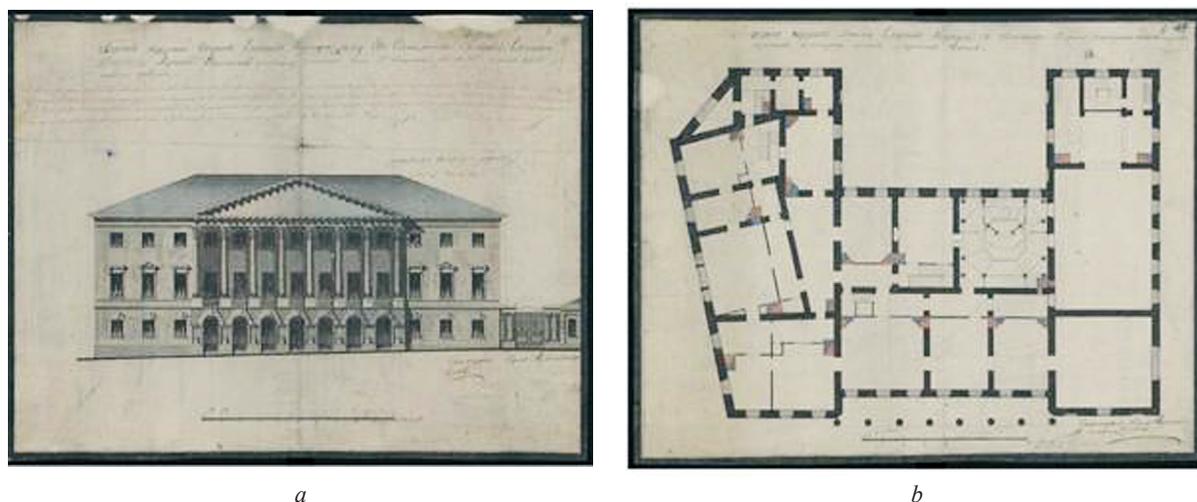


Рис. 4. Главный дом усадьбы Мусиных-Пушкиных на Спартаковской (Елоховской) улице в Москве. Середина 1830-х гг.: *a* — главный фасад; *b* — план 3-го этажа. Из материалов архитектурного обследования НИИП НИУ МГСУ

Fig. 4. The main house of the Musin-Pushkin Estate in Spartakovskaya (Elohovskaya) st. in Moscow. Middle 1830th: *a* — the main facade; *b* — 3rd floor plan. From architectural research materials NIIP NRU MGSU

сигновано почти 160 тысяч рублей. Завершились они в июле 1836 г., и в этом же году сделан первый набор в открывшуюся в доме коллекционера 2-ю Московскую гимназию (рис. 4).

До второй половины 1840-х гг. все этажи основного гимназического здания соединялись деревянными лестницами. Однако в 1847 г. чугунные лестничные марши между вторым и третьим этажами сменили деревянные. Тогда же «для помещения параллельных классов» реконструировали центральную часть главного корпуса [11]. А в 1857 г. на средства потомственного почетного гражданина купца И.Ф. Мамонтова чугунную лестницу устроили между первым и вторым ярусами [12].

В 1866 г. в память о чудесном спасении императора Александра II во время попытки Д.В. Каракозова застрелить царя в гимназии решили открыть церковь. Для этой цели на два яруса был разбит так называемый тронный зал, находящийся в южной трети здания. В верхнем двухсветном ярусе устроили храм (рис. 5), а в первом этаже разместили один из классов. Церковь во имя Андрея Первозванного завершили в конце ноября 1867 г. («ко дню храмового праздника»), но ее освящение состоялось только 16 января 1868 г. [13].

Увеличение числа учащихся и соответственно преподавателей и обслуживающего персонала вызвало потребность в расширении гимназического комплекса. Решение о реконструкции существующих строений и о постройке на территории комплекса еще одного здания принято в конце 1904 г., в марте 1905 г. государь разрешил выдать кредит на предполагаемые работы [14]. Однако революционные события 1905–1907 гг. и ликвидация их последствий, вероятно, на несколько лет приостановили видоизменение 2-й Московской гимназии. В итоге обновление главного здания усадьбы Мусиных-Пушкиных

пришлось на начало 1910-х гг. [15]. Результатом этих работ стало появление на территории усадьбы вытянутого по оси восток – запад здания, северо-западный угол которого примкнул к юго-восточной части северного ризалита главного дома.

Значительные перестройки были произведены в основном здании усадьбы после того, как в 1923 г. здесь обосновался Индустриально-педагогический институт имени Карла Либкнехта [16]. Именно с этим институтом связана надстройка главного корпуса четвертым ярусом, что сделало и без того подчеркнуто монументальное здание эпохи классицизма тяжеловесным и даже громоздким сооружением. Произошло это, возможно, в начале 1930-х гг., когда рядом с бывшим гимназическим комплексом (к западу от него) для нужд института возвели еще ряд учебных корпусов, архитектура которых была выдержана в духе доминирующего в тот период конструктивизма [17]. В это же время 4-й этаж появляется и над зданием гимназического корпуса 1910-х гг. постройки. А его восточная сторона получает массивный 4-этажный объем, для строительства которого демонтируется часть исторического северного флигеля.

После переезда в 1943 г. в усадебный комплекс Московского инженерно-строительного института в первые годы серьезные обновления главного здания не коснулись, однако во второй половине 1950-х гг. (в 1957 г.) в юго-западной части дома перестроена главная лестница [18], а годом позже (в 1958 г.) в образумый восточной частью здания курдонер на уровне первого яруса ввели входной вестибюль [19].

1960-е гг. отмечены не только реконструкцией отдельных элементов внутренней структуры главного дома, но и стремлением провести реставрацию его фасадов [20], что привело к появлению ряда графических документов [21].



Внутренний видъ церкви Московской 2-й гимназии.

**Рис. 5.** Церковь в главном здании 2-й Московской гимназии на Спартаковской (Елоховской) улице в Москве. Фото 1880-х гг.<sup>1</sup>

**Fig. 5.** Church in the main building of the 2-nd Moscow Gymnasium on Spartakovskaya (Elovovskaya) street in Moscow. Photo from the 1880<sup>1</sup>

В таком виде, представляя образец городской усадьбы в духе классицизма, постройку можно видеть и сегодня. Имея такую обширную строительную историю, представленную в структуре памятника различными архитектурными напластованиями, сложившаяся архитектурная композиция значительно отличается от подлинной, заданной автором объемно-планировочной структуры.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрев историю формирования столь сложной многосоставной постройки, особое внимание стоит уделить анализу выявленной строительной периодизации, а также сохранности архитектурных форм тех или иных периодов.

Основными материалами для проведения исследования стали результаты историко-библиографической работы и произведенных на объекте натуральных исследований, в результате которых выявлен значительный пласт архитектурной археологии.

Использован сравнительно-исторический метод, позволивший рассмотреть материалы исследования в кругу стилистически и типологически близких примеров. Также проанализированы примеры реставрационных работ прошлых лет, примененные в отношении аналогичных многосоставных построек с богатой строительной историей. Произведен анализ примененных на данных постройках

методов реставрации и сохранения более древних фрагментов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализируя полученные историко-библиографические материалы и данные натуральных исследований на памятнике, можно выделить семь основных строительных периодов, начальные из которых были освещены в упомянутой ранее работе [2].

Так, I и II [22] этапы формирования памятника неразрывно связаны с построенным в середине XVIII столетия двухэтажным домом в барочной стилистике, принадлежавшим Д.А. Шепелеву. Произведенные в начале XIX в. полномасштабные строительные работы обусловили III строительный период и положили начало масштабным преобразованиям, открывшим новый классицистический этап в судьбе домовладения. К данному периоду также стоит отнести работы по восстановлению постройки после пожара 1812 г., проведенные в 1813–1814 гг. Сохранив подлинную объемно-планировочную структуру, эти работы по большей части коснулись декоративно-художественного убранства памятника, которое, по всей видимости, получило некоторые поновления.

IV строительный период соответствует 1830-м гг. и связан с приобретением зданием нового функционального назначения и приспособлением главного

<sup>1</sup> Гулевич С. Историческая записка о 50-летию Московской 2-й гимназии. 1835–1885. М., 1885.

дома усадьбы под нужды 2-й Московской гимназии. В интерьерах некогда усадебного дома устраиваются аудитории для учащихся и комнаты для проживания пансионеров.

V строительный период можно идентифицировать последней третью XIX в., так как перепланировка, выполняемая в целях приспособления здания под учебное заведение, не ограничилась лишь 1830 гг., а проводилась в течение всего периода эксплуатации вплоть до конца XIX столетия, привнося в интерьеры памятника все новые элементы. В последней трети XIX в. интерьеры получают новую чугунную лестницу, объединяющую второй и третий этажи здания, а в одном из двухсветных залов устраивается перекрытие, над которым в уровне третьего этажа располагается церковь.

VI строительный период можно соотнести с 1910 гг. и охарактеризовать значительными строительными работами как непосредственно в главном доме, так и на территории ансамбля. Так, к главной постройке усадьбы пристраивается вытянутое трехэтажное строение гимназического корпуса, где располагаются аудитории для учащихся. В результате такого преобразования была разобрана часть наружной стены исторического объема главного дома, а территория домовладения разделена на две неравные части.

VII строительный период соответствует 1930-м гг. Данный период, вероятно, нанес наибольший урон как главному зданию усадьбы, так и архитектурному ансамблю в целом. В это время исторический объем главного дома, как и гимназический корпус

1910-х гг., получает надстройку четвертым этажом, что в значительной мере исказило подлинную классицистическую композицию памятника и объемно-пространственную структуру домовладения.

В дальнейшем на протяжении всего периода эксплуатации здания неоднократно проводились текущие ремонты и поновления, выделять которые в отдельный строительный период нет необходимости. Стоит упомянуть лишь о возведении в конце 1950-х гг. в курдонере дворового фасада массивной одноэтажной с подвалом пристройки, служившей просторным вестибюлем при входе в исторический объем здания. Интересно, что проектом 1970-х гг. предложена более основательная концепция реставрации с разборкой четвертого более позднего этажа главного дома, но до реализации задуманного дело так и не дошло.

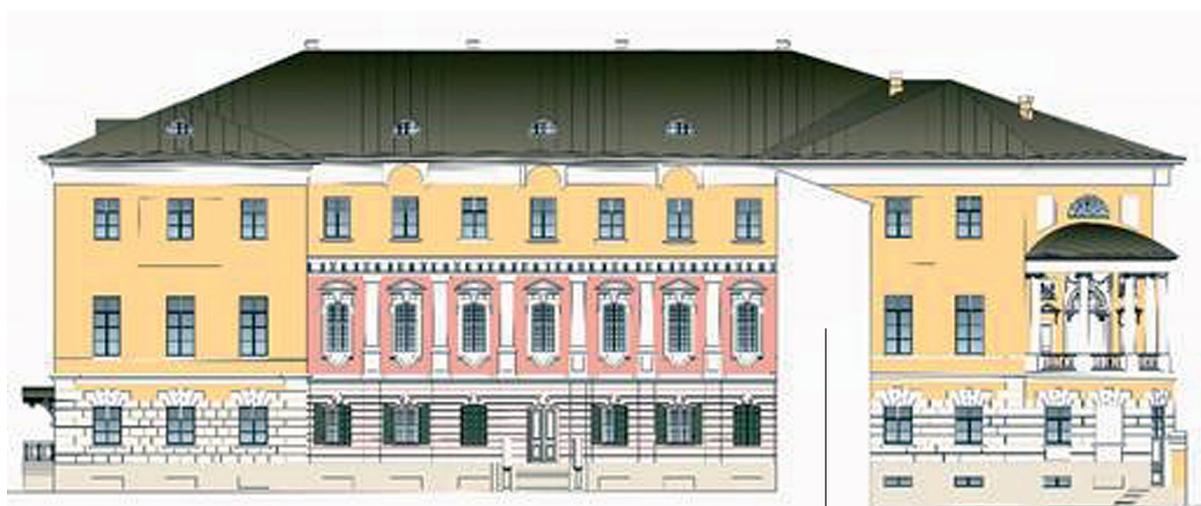
Подобной концепции целесообразно придерживаться и сегодня, предлагая проект реставрации памятника на V строительный период, что соответствует последней трети XIX в. (рис. 6). Однако, помимо предложенных в 1970-е гг. работ по демонтажу четвертого яруса и выявлению подлинного классицистического облика главной постройки домовладения, справедливо предложить выполнение архитектурных раскрытий I строительного периода, относящегося к середине XVIII столетия и раскрывающего участки стен первоначальной барочной постройки.

Таковыми архитектурными раскрытиями могут стать два фрагмента стен дома Д.А. Шепелева, выявить которые удалось в ходе проведенных иссле-



Рис. 6. Вторая московская гимназия на площади Разгуляй в Москве. Фото начала XX в. Из материалов архитектурного обследования НИИП НИУ МГСУ

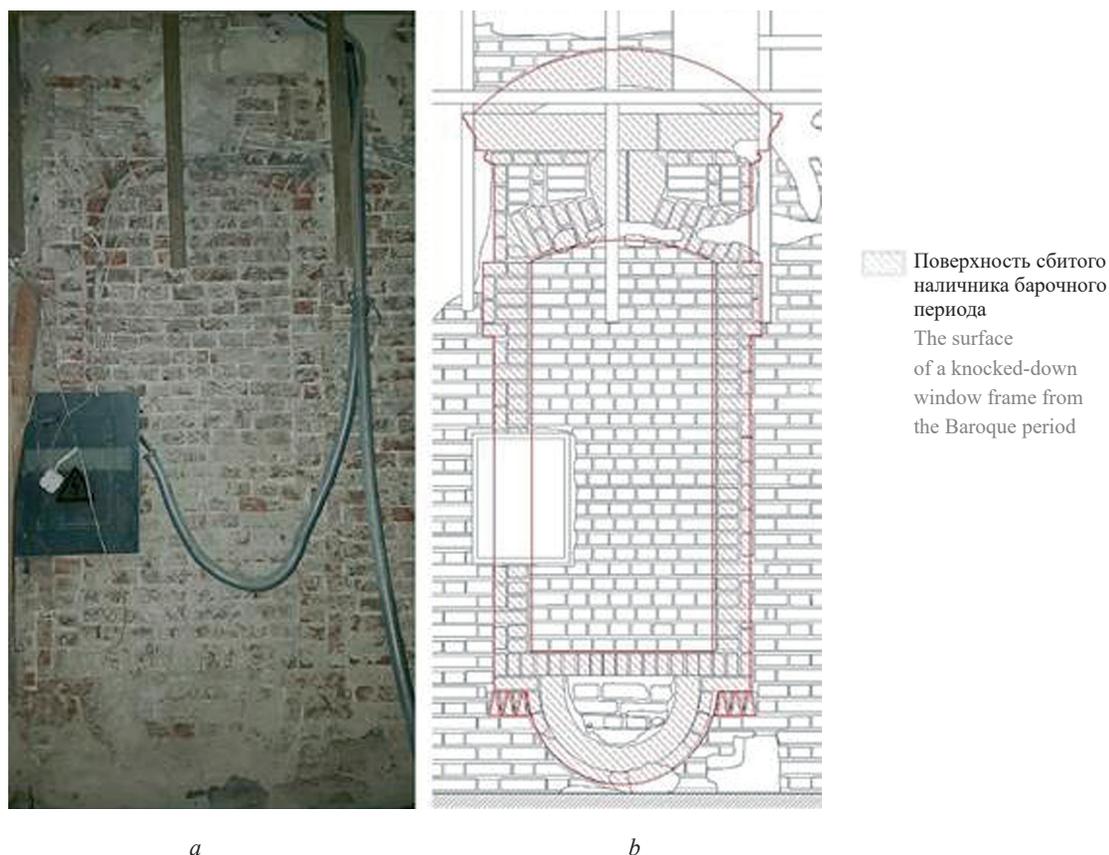
Fig. 6. The 2-nd Moscow Gymnasium on Razgulay square in Moscow. Photo of the beginning of XX century. From architectural research materials NIIP NRU MGSU



Примыкающее здание 1910-х гг.  
The adjoining building from the 1910s.

**Рис. 7.** Восточный фасад главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице в Москве. Графическая реконструкция на V строительный период (последняя треть XIX в.) с архитектурным раскрытием I строительного периода, восточной стены дома Д.А. Шепелева (середина XVIII в.). Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

**Fig. 7.** The eastern facade of the main house of the Musin-Pushkin Estate in Spartakovskaya Street in Moscow. Graphical reconstruction of the 5th construction period (the last quarter of XIX c.) with architectural probe, representing 1st construction period, an eastern wall of the D.A. Shepelev's house (middle XVIII c.). Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU



**Рис. 8.** Главный дом усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице в Москве: *a* — зондаж по второму ярусу северного фасада дома Д.А. Шепелева, срубленный оконный наличник (фото 2022 г.); *b* — фиксация зондажа по второму ярусу северного фасада дома Д.А. Шепелева

**Fig. 8.** The main house of the Musin-Pushkin Estate in Spartakovskaya Street in Moscow: *a* — probing at the 2nd tier of the northern facade of the Shepelev's house, cutted window frame (photo 2022); *b* — recording of the probing at the 2nd tier of the northern facade of the Shepelev's house

дований. Наиболее значительным из них является участок стены восточного фасада, расположенный в курдонере дома Мусиных-Пушкиных и в настоящее время скрытый одноэтажной пристройкой, возведенной в 1958 г. Данное архитектурное раскрытие занимает собой всю восточную стену курдонера и простирается от южного до северного ризалита главного дома, тем самым полностью раскрывая восточную стену дома Д.А. Шепелева и представляя облик утраченной постройки от цоколя до венчающего карниза (рис. 7).

Восточная стена двухэтажного барочного дома имеет семь световых осей, центральная из которых представлена дверным проемом на первом этаже здания, оформляющим входную группу дворового фасада. Формируют световые оси как на 1-м, так и на 2-м ярусах ряд прямоугольных оконных проемов, завершенных лучковым очельем, верхние из которых имеют более вытянутую форму. Проемы 1-го яруса выделены неглубокой четвертью и декорированы замковым камнем. Окна 2-го этажа украшены развитым барочным наличником, представленным в двух вариантах исполнения. Разнообразие вносят профилированные сандрики, одни из которых выполнены в виде фронтона, другие имеют завершение лучковой формы. Оконные проемы 1-го этажа закрывают металлические ставни, окрашенные в зеленый цвет. Пространство между проемами заполняют рустованные пилястры, повторяющие рустовку стен 1-го яруса, и более сложные в уровне 2-го, украшенные белокаменными капителями и базами на массивной тумбе. Ярусность фасада подчеркнута профилированным междуэтажным карнизом, разделяющим 1-й и 2-й этажи постройки. Завершает композицию широкий венчающий карниз, установленный на белокаменные капители пилястр 2-го этажа.

Второе архитектурное раскрытие менее масштабно и обращено в интерьер существующей постройки. Это один из оконных проемов 2-го этажа дома Д.А. Шепелева. В процессе перестройки дома на рубеже XVIII–XIX вв. он был заложен, а его кирпичный наличник с белокаменными деталями стесан (рис. 8). Данное архитектурное раскрытие может быть реализовано различными методами оформления и сохранения подобных более древних включений в структуре сложившегося памятника. Это может быть как консервация выявленной кирпичной кладки, как экспоната архитектурной археологии, так и реставрация барочного оконного наличника с выявлением его первоначального облика и воссозданием подлинного столярного заполнения. Выбор методики целесообразно рассмотреть в рамках полномасштабного проекта реставрации и приспособления объекта.

Выбирая методику сохранения данных архитектурных раскрытий, стоит обратить внимание на типологически близкие сооружения, в структу-



Рис. 9. Палаты Милославских – Меллера. Москва, Армянский пер. д. 2. Фото 2023 г.

Fig. 9. Miloslavskiyе – Meller Chambers. 2, Armyansky Lane, Moscow. Photo 2023



Рис. 10. Особняк П.С. Хлопова – Н.А. Ермолова. Москва, Леонтьевский пер., д. 6, стр. 12

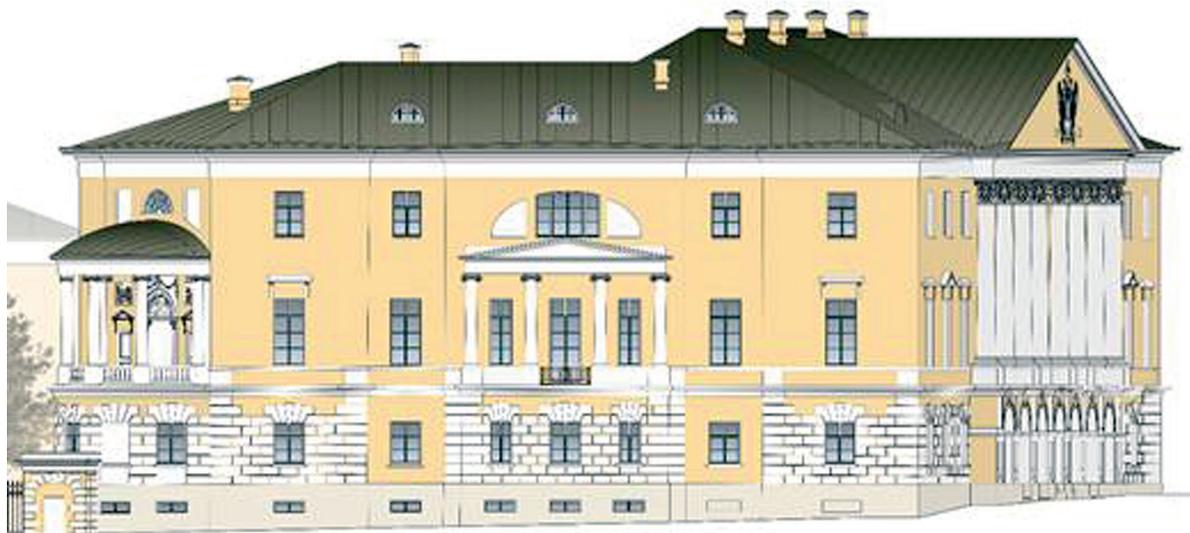
Fig. 10. P.S. Khlopov's – N.A. Yermolov's mansion. Moscow, Leont'yevskiy lane, 6, building 1<sup>2</sup>



Рис. 11. Жилой дом А.В. Сухово-Кобылина, конец XVII–XVIII вв. Москва, Большой Харитоньевской пер., д. 17/13. Фото 2023 г.

Fig. 11. A.V. Sukhovo-Kobylin's living house, end of XVII–XVIII centuries. Moscow, Bolshoy Khariton'yevskiy lane, 17/13. Photo 2023

<sup>2</sup> URL: retromap.ru



**Рис. 12.** Северный фасад главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице в Москве. Графическая реконструкция на V строительный период (последняя треть XIX в.). Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ  
**Fig. 12.** The northern facade of the main house of the Musin-Pushkin Estate on Spartakovskaya Street in Moscow. Graphical reconstruction of the 5th construction period (the last quarter of XIX c.). Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU

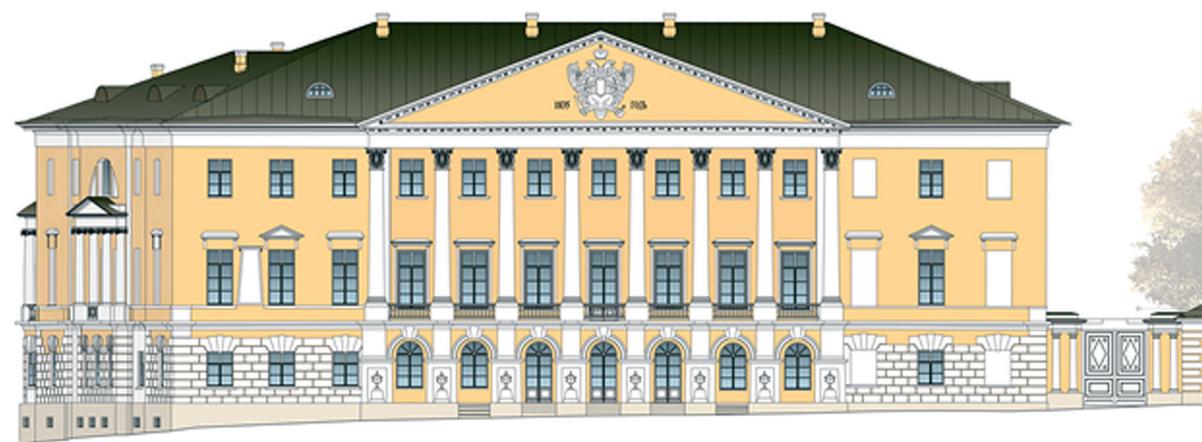
ре которых также были выявлены включения более ранних построек, некогда имевших самостоятельную архитектурную стилистику. Это палаты Милославских – Меллера в Армянском переулке (рис. 9), особняк П.С. Хлопова – Н.А. Ермолова в Леонтьевском переулке (рис. 10), жилой дом А.В. Сухово-Кобылина в Большом Харитоньевском переулке (рис. 11), усадьба Кошелевых-Золотаревых в Потаповском переулке, дом Долгоруковых в Колпачном переулке.

Несмотря на разнообразие раскрываемых форм и архитектурных стилей, выполненных на данных памятниках, раскрытия позволяют представить не только сложившийся в результате своеобразной

эволюции облик здания, но и показать изначальную архитектуру постройки, стоящую в основе существующего строения. Подобного внимания достоин и дом Д.А. Шепелева, послуживший основой для строительства главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных на Разгуляе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вне всякого сомнения, предложенная концепция может иметь ряд поправок и допущений, однако, обладая значительным количеством артефактов архитектурной археологии, этот вариант можно рас-



**Рис. 13.** Главный (западный) фасад дома усадьбы Мусиных-Пушкиных с воротами со стороны Доброслободской улицы в Москве. Графическая реконструкция на V строительный период (последняя треть XIX в.). Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

**Fig. 13.** The main (western) facade of the Musin-Pushkin Estate with gates, view from the Dobroslobodskaya str. in Moscow. Graphical reconstruction of the 5th construction period (the last quarter of XIX c.). Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU

смагивать как наиболее достоверный. Выбранная концепция даст возможность не только выразить архитектурный облик классицистической постройки начала XIX в. (рис. 12, 13), но и показать фрагменты более древней барочной архитектуры, стоящей в основе домовладения на Разгуляе.

Предложенные раскрытия позволят обогатить архитектурную составляющую как основного зда-

ния усадьбы, так и домовладения в целом. В то же время, учитывая многообразие поздних, в том числе и ценных напластований, методику реставрационных работ и характер архитектурных раскрытий можно определить в контексте общей концепции реставрации памятника с учетом его архитектурных особенностей, предмета охраны и степени сохранности элементов различных строительных эпох.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ситин П.В. Из истории московских улиц. М., 1958. С. 673.
2. Иванцык Т.В., Салимов А.М. Дом Д.А. Шепелева в составе главного дома усадьбы Мусиных-Пушкиных по материалам историко-архитектурных исследований // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 6. С. 829–840. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.829-840
3. ЦГА Москвы. Ф. 105. Оп. 1. Д. 635. 1790 г. Л. 1.
4. Белицкий Я.М. Спартаковская улица, 2/1. М., 1986. С. 10–11.
5. Иванцык Т.В., Салимов А.М. Северный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 5. С. 547–558. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.547-558
6. Иванцык Т.В., Салимов А.М. Восточный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 10. С. 1307–1323. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1307-1323
7. Иванцык Т.В., Салимов А.М. Ограда усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 3. С. 265–278. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.265-278
8. ЦГА Москвы. Ф. 163. Оп. 5. Д. 18. 1814 г. Л. 22.
9. РГАДА. Ф. 1270. Оп. 1. Д. 756. 1813 г. Л. 9 об.
10. ЦГА Москвы. Ф. Т-1. Оп. 2. Д. 173 (437/291; 2).
11. Гулевич С. Историческая записка о 50-летию Московской 2-й гимназии... С. 14–15.
12. Гулевич С. Историческая записка о 50-летию Московской 2-й гимназии... С. 5.
13. Гулевич С. Историческая записка о 50-летию Московской 2-й гимназии... С. 158–160, 308.
14. Гулевич С. Историческая записка о 50-летию Московской 2-й гимназии... Л. 5 об. 6 об.
15. Архив Мосводоканала. РКС. № 2. СЭ № 2. Д. 636. 1913 г. Л. 2.
16. Белицкий Я.М. Спартаковская улица, 2/1. М., 1986. С. 33–53.
17. ЦГА Москвы. Ф. 2. Оп. 1. Д. 8893. 1930 г. Л. 8.
18. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1721. 1957 г. Л. 3.
19. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1719. 1958 г. Л. 6-8, 10.
20. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1721. Л. 8.
21. Салимов А.М., Салимова М.А. Историко-архивные и библиографические исследования. М., 2018.
22. ЦГА Москвы. Ф. 171. Оп. 1. Д. 281. 1799 г. Л. 2.

Поступила в редакцию 12 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 29 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 5 мая 2025 г.

**ОБ АВТОРЕ:** Тимур Викторович Иванцык — архитектор-реставратор I категории, главный архитектор отдела реставрации Научно-исследовательского института проектирования (НИИП), преподаватель кафедры основ архитектуры и художественных коммуникаций, член Союза реставраторов России; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; timurahc@yandex.ru.

## REFERENCES

1. Sitin P.V. *From Moscow streets history*. Moscow, 1958 y. Sheet 673. (rus.).
2. Ivantsyk T.V., Salimov A.M. D.A. Shepelev's house as part of the main house of the Musin-Pushkin estate based on the materials of historical and architectural research. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(6):829-840. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.829-840 (rus.).

3. Moscow Central State Archive. Fund 105. L. 1. File 635. 1790. Sheet 1. (rus.).
4. Belitskiy Y.M. *Spartakovskaya street, 2/1*. Moscow, 1986; 10-11. (rus.).
5. Ivantsyk T.V., Salimov A.M. The north wing of the Musin-Pushkin estate in Moscow: historical, architectural and field studies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):547-558. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.547-558 (rus.).
6. Ivantsyk T.V., Salimov A.M. The Eastern wing of the Musin-Pushkin estate in Moscow based on historical, architectural and field studies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(10):1307-1323. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1307-1323 (rus.).
7. Ivantsyk T.V., Salimov A.M. The fence of Musin-Pushkin estate in Moscow based on historical, architectural and field studies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):265-278. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.265-278 (rus.).
8. Moscow Central State Archive. Fund 163. L. 5. File 18. 1814. Sheet 22. (rus.).
9. Russian state archive of ancient documents. Fund 1270. L. 1. File 756. 1813. Sheet 9 back. (rus.).
10. Moscow Central State Archive. Fund T-1. L. 2. File 173 (437/291; 2). (rus.).
11. Gulevich S. *Historical note about 50th anniversary of Moscow 2nd gymnasium...* Sheet 14-15. (rus.).
12. Gulevich S. *Historical note about 50th anniversary of Moscow 2nd gymnasium...* Sheet 5. (rus.).
13. Gulevich S. *Historical note about 50th anniversary of Moscow 2nd gymnasium...* Sheet 158-160, 308 (rus.).
14. Gulevich S. *Historical note about 50th anniversary of Moscow 2nd gymnasium...* Sheet 5 back – 6 back (rus.).
15. Mosvodokanal Archive. Sanitation District No. 2. Maintenance Service No. 2. File 636. 1913. Sheet 2 (rus.).
16. Belitskiy Y.M. *Spartakovskaya street, 2/1*. Moscow, 1986; 33-53. (rus.).
17. Moscow Central State Archive. Fund 2. L. 1. File 8893. 1930 y. Sheet 8. (rus.).
18. Moscow Central State Archive. Fund T-125. L. 4. File 1721. 1957 y. Sheet 3. (rus.).
19. Moscow Central State Archive. Fund T-125. L. 4. File 1719. 1958 y. Sheet 6-8, 10. (rus.).
20. Moscow Central State Archive. Fund T-125. L. 4. File 1721. Sheet 8. (rus.).
21. Salimov A.M., Salimova M.A. *Historical, archive, and bibliographic studies*. Moscow, 2018. (rus.).
22. Moscow Central State Archive. Fund 171. L. 1. File 281. 1799 y. Sheet 2. (rus.).

Received February 12, 2025.

Adopted in revised form on April 29, 2025.

Approved for publication on May 5, 2025.

**BIONOTES:** **Timur V. Ivantsyk** — architect-restorer of the 1st category, chief architect of the restoration department of the Scientific Research Institute of Design, lecturer of the Department of Fundamentals of Architecture and Artistic Communications, member of the Union of Restorers of Russia; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; timurahc@yandex.ru.

## Определение морского пространственного планирования в градостроительной системе Российской Федерации

Павел Павлович Спирин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт перспективного градостроительства (НИИ ПГ); г. Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (ЦНИИП Минстроя России); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** На значительные по площади морские пространства распространяется суверенитет России, а достаточно большой состав видов хозяйственной деятельности, которые формируются на морских акваториях, нуждается в пространственном планировании и правовом регулировании. В основе методологии исследования применены пространственный и нормативно-правовой подходы. Представлены методология и структура морского комплексного плана, предложена система взаимосвязанных документов территориального и морского планирования, рассмотрены принципы развития приморских территорий и прибрежных акваторий морей как взаимосвязанных объектов планирования. Для разграничения морской акватории по функциональному использованию для различных субъектов морской деятельности предлагается применение градостроительных методов и подходов территориального планирования. Территориальное и морское пространственное планирование (МПП) объединяет прибрежные акватории и приморские территории в единый объект управления. Данное положение рассмотрено на примере приморских регионов, для комплексного развития которых необходима разработка комплексных морских планов.

**Материалы и методы.** Проведен анализ отечественных исследований и международной практики в области МПП, сопоставлены инструменты морского и территориального планирования, варианты реализации инструментария МПП.

**Результаты.** Обоснована и предложена структура документов МПП, содержание морских комплексных планов и их связь с документами территориального планирования.

**Выводы.** Реализация МПП на национальном и региональном уровне позволит дополнительно усилить позиции страны в новых геополитических раскладах освоения Арктики, акваторий Тихого и Атлантического океанов. Морское пространственное планирование имеет также большое значение для исключения межотраслевой несогласованности субъектов морской деятельности и уполномоченных контрольных органов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** морское планирование, комплексный морской план, виды морской деятельности, зонирование морской акватории, субъекты морской деятельности, приморская территория, территориальное планирование, комплексное управление прибрежными зонами, правила морской хозяйственной деятельности

*Благодарности.* Автор выражает благодарность редакции и рецензентам.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Спирин П.П. Определение морского пространственного планирования в градостроительной системе Российской Федерации // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 1000–1016. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1000-1016

*Автор, ответственный за переписку:* Светлана Исмагиловна Садретдинова, sveta030508@mail.ru.

## Determination of marine spatial planning in the urban planning system of the Russian Federation

Pavel P. Spirin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Scientific Research Institute of Perspective Urban Development (NII PG); Saint Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup> Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation; Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Russia's sovereignty extends to significant areas of the sea, and a fairly large number of economic activities that are formed in marine areas need spatial planning and legal regulation. The research methodology is based on spatial and regulatory approaches. The paper presents the methodology and structure of the marine integrated plan, proposes a system of interrelated territorial and marine planning documents, and examines the principles of development of coastal territories and coastal waters of the seas as interrelated planning objects. The use of urban planning methods and approaches of territorial planning is proposed to differentiate the marine area by functional use for various subjects of marine activity. Territorial and marine spatial planning unites coastal waters and coastal territories into a single management object. This provision is considered on the example of the coastal regions, for the integrated development of which it is necessary to develop comprehensive marine plans.

**Materials and methods.** The paper analyzes domestic research and international practice in the field of marine spatial planning, compares the tools of marine and territorial planning, and the implementation options for marine spatial planning tools. **Results.** The structure of marine spatial planning documents, the content of marine integrated plans and their relationship to territorial planning documents are substantiated and proposed.

**Conclusions.** The implementation of marine spatial planning at the national and regional levels will further strengthen the country's position in the new geopolitical developments in the development of the Arctic, Pacific and Atlantic seas. Marine spatial planning is also of great importance for eliminating cross-sectoral inconsistencies between the subjects of marine activities and authorized control bodies.

**KEYWORDS:** marine planning, integrated marine plan, types of marine activities, zoning of the marine area, subjects of marine activity, coastal territory, territorial planning

**Acknowledgments.** The author expresses gratitude to the editors and reviewers.

**FOR CITATION:** Spirin P.P. Determination of marine spatial planning in the urban planning system of the Russian Federation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):1000-1016. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1000-1016 (rus.).

*Corresponding author:* Svetlana I. Sadretdinova, sveta030508@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Конституцией Российской Федерации «территория Российской Федерации включает в себя территории ее субъектов, внутренние воды и территориальное море, воздушное пространство над ними»<sup>1</sup>. Общая площадь морских пространств, находящихся под суверенитетом или юрисдикцией РФ, значительна и составляет около 7,5 млн км<sup>2</sup>, что свидетельствует о большой роли морских ресурсов в устойчивом развитии страны<sup>2</sup>.

В Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.08.2019 № 1930-р, к одной из основных стратегических целей отнесен «переход к комплексному подходу к планированию развития приморских территорий и прибрежных акваторий конкретных побережий страны путем выделения их в отдельный единый объект государственного управления»<sup>3</sup>. Согласно данному документу рекомендована разработка прибрежно-морских компонентов стратегий социально-экономического развития приморских субъектов РФ, а также программ развития муниципальных образований. В связи с чем возникает необходимость совместной подготовки документов территориального и морского планирования. Основные проблемы в реализации указанного подхода заключаются в отсутствии методической и нормативной правовой базы, определяющей разработку стратегических документов морского пространственного планирования (МПП).

Следует отметить, что в Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года<sup>4</sup> вновь поднимается вопрос о планировании использования морских пространств во взаимосвязи с развитием приморских территорий, что повышает актуальность методического и правового обеспечения этого направления.

В большинстве стран, с которыми РФ имеет морскую границу (прежде всего в странах Европейского союза), созданы системы морского пространственного планирования, позволяющие за счет зонирования акваторий и установления ограничений на виды деятельности эффективно использовать морские ресурсы, отстаивать свои экономические интересы [1].

Так, 17 апреля 2014 г. Европарламент принял Директиву ЕС по морскому пространственному планированию<sup>5</sup>, согласно которой к 2021 г. должны быть выполнены морские планы всех приморских членов Евросоюза [2]. В этом документе морское пространственное планирование рассматривается как необходимый инструмент комплексной морской политики, предназначенный для сбалансирования конкурирующих отраслевых интересов при условии эффективного и стабильного использования морских акваторий и морских ресурсов.

Рассматривая конкретные направления исследований в первые десятилетия XXI в. в области морского пространственного планирования, можно отметить, что значительное внимание российских ученых уделялось вопросам оценки негативного

<sup>1</sup> Конституция Российской Федерации (принята всенародным голосованием 12.12.1993 с изменениями, одобренными в ходе общероссийского голосования 01.07.2020).

<sup>2</sup> Концепция федеральной целевой программы «Мировой океан» на 2016–2031 годы : утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 22.06.2015 № 1143-р (в редакции Распоряжения Правительства Российской Федерации от 06.11.2024 № 3140-р).

<sup>3</sup> О Стратегии развития морской деятельности РФ до 2030 года : Распоряжение Правительства РФ от 30.08.2019 № 1930-р. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72573254/>

<sup>4</sup> Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года : утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28.12.2024 № 4146-р. URL: <http://government.ru/docs/all/157308/>

<sup>5</sup> URL: <http://niipgrad.spb.ru/UserFiles/Publication/424.pdf>

воздействия на экосистемы морей и океанов морехозяйственной деятельности (нефтедобычи, судоходства, рыболовства и др.). Научные исследования носили преимущественно отраслевой характер, выявляя закономерности пространственного распределения биологических ресурсов, минеральных ресурсов, ценных морских экосистем, требующих особой защиты, и были ориентированы на обеспечение отраслевых интересов, сохранение биоразнообразия морей и океанов.

К наиболее значимым исследованиям этого периода в области морепользования следует отнести труды Мурманского морского биологического института Кольского научного центра РАН (ММБИ КНЦ РАН), в том числе монографию А. А Шавыкина и Г.В. Ильина «Оценка интегральной уязвимости Баренцева моря от нефтяного загрязнения» (2010) [3]; «Атлас биоразнообразия морей и побережий Арктики» (Издательство WWF России), разработанный в 2011 г. А.В. Спиридоновым, М.В. Гаврило, Е.Д. Красновой и Н.Г. Николаевым [4]. В этих и последующих работах ММБИ КНЦ РАН процедуры зонирования акваторий Баренцева и Карского морей осуществлялись в упрощенной форме.

Учеными Российского государственного гидрометеорологического университета Г.Г. Гогоберидзе и А.Ю. Домниной в статье «Возможные конфликты между видами морской деятельности в акваториях российской части юго-восточной Балтики и разработка рекомендаций по их предотвращению» [5] поднята проблема взаимодействия различных видов морской деятельности. Однако этими авторами не рассматривались инструменты и перспективы МПП в нашей стране.

Начиная с 2012 г. Россия стала подготавливать базу для обеспечения возможности внедрения МПП в стратегическое планирование страны. В рамках НИР «Разработка инструментария морского акваториального (пространственного) планирования и предложений по его применению на примере Балтийского моря»<sup>6</sup> авторами работы (С.Д. Митягин, П.П. Спири́н и др.) были разработаны методология и предложения по правовому обеспечению морского планирования [6]. Для апробации методики выполнен пилотный проект морского пространственного плана акватории российской части Финского залива (Ленинградская область и Санкт-Петербург) и юго-восточной Балтики (Калининградская область), учитывающий как национальные, так и международные требования по обеспечению устойчивого

развития стран Балтийского региона и сохранению морских экосистем [7].

Результаты данной работы стали основой для разработки в 2014 г. концепции закона «О морском пространственном планировании». Но в настоящее время в этом направлении законодательная деятельность отсутствует, хотя в современных условиях морское пространственное планирование приобретает особую актуальность.

Труд польского ученого Яцека Зауха «Ключ к управлению хрупким Балтийским морем. Морское пространственное планирование в Балтийском регионе и перспективы на будущее» (Jacek Zaucha “The key to governing the fragile Baltic Sea. Maritime Spatial Planning in Baltic Region and Way Forward. Riga, 2014”) интересен с точки зрения формирования единого подхода к морскому планированию в странах Балтийского региона, в том числе в странах, имеющих морские границы с Россией [8, 9].

Развитие методологии МПП для России осуществлялось в рамках российско-немецкого проекта MSP-RUS «Эколого-ориентированные подходы к использованию пространства российской части Балтийского моря» (2014–2016 гг.), разработчиками проекта со стороны России стали специалисты ООО «Научно-исследовательский институт перспективного градостроительства», со стороны Германии — ученые Института экологического городского и регионального развития имени Лейбница и Института морских исследований имени Лейбница [10]. В рамках проекта MSP-RUS разработана экологически обоснованная концепция использования морской акватории российской части Финского залива Балтийского моря. Результаты проекта получили отражение в ряде публикаций Института морских исследований имени Лейбница, которые использованы в настоящей статье в качестве теоретической основы для разработки механизмов взаимодействия приморских территорий и прибрежных акваторий.

Тема МПП как инструмента стратегического развития поднимается в статьях С.Д. Митягина, В.М. Мякиненкова, П.П. Спирина (Научно-исследовательский институт перспективного градостроительства). После публичных выступлений и публикаций этих ученых, обосновывающих взаимосвязи морского и территориального планирования, в ряде приморских регионов начинаются работы в этом направлении [1, 6, 7, 11, 12].

Статья П.Я. Бакланова «Морское пространственное планирование: теоретические аспекты»<sup>7</sup> (Тихоокеанский институт географии, Дальневосточное

<sup>6</sup> Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка инструментария морского акваториального (пространственного) планирования и предложений по его применению на примере Балтийского моря». ОАО «Научно-исследовательский и проектный институт по разработке генеральных планов и проектов застройки городов». СПб., 2012. 68 с.

<sup>7</sup> Бакланова П.Я. Морское пространственное планирование: теоретические аспекты. URL: [https://balticregion.kantiana.ru/upload/iblock/ff5/5-%D0%91%D0%B0%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2\\_76-85.pdf?ysclid=m7vytru6bq733824740](https://balticregion.kantiana.ru/upload/iblock/ff5/5-%D0%91%D0%B0%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2_76-85.pdf?ysclid=m7vytru6bq733824740)

отделение РАН), опубликованная в журнале «Балтийский регион» в 2018 г., подтверждает, что морское пространственное планирование МПП должно стать важнейшим инструментом пространственного социально-экономического развития приморских регионов [13, 14].

Большой вклад в развитие инструментария комплексного управления прибрежными зонами (КУПЗ) внес российский ученый Ю.Г. Михайличенко. Основная задача КУПЗ — формирование эффективной модели управления режимами природопользования и условий для раскрытия экономического потенциала прибрежных территорий [15–17].

Статья О.Ю. Корнеева «Первый российский опыт применения процедур морского пространственного планирования в российской части Баренцева моря» (журнал «Арктика и инновации» 2023)<sup>8</sup>, несмотря на название, ориентирована на решение проблем морепользования в рамках отдельных отраслей, о чем свидетельствуют приведенные на рисунках карты интегральных (комплексных) планов пространственного распределения биоразнообразия. Процедуру морского пространственного планирования, по мнению автора настоящего исследования, следует рассматривать во взаимосвязи с территориальным планированием, определяющей функциональные зоны и допустимые виды использования участков прибрежной акватории и приморской территории.

В представленном исследовании выдвигается гипотеза преемственности принципов, методов и подходов территориального планирования и МПП, обосновывается необходимость формирования общих правил МПП, обязательных для всех уровней подготовки национальных документов в этой области.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализируя зарубежный опыт реализации МПП можно выделить два основных подхода к определению границ планирования — выделение морских районов планирования и планирование всей находящейся под юрисдикцией государства акватории. К выделению морских районов планирования прибегают страны, имеющие обширные

морские пространства, различные водосборные бассейны, которые в разных своих частях значительно отличаются по климатическим, экологическим, экономическим и другим показателям. Крупные морские районы для планирования были выделены в Китае<sup>9</sup>; Австралии, Канаде [18]; США<sup>10</sup>; Норвегии, Великобритании [19]; Германии [10]; Бельгии, Франции [20]; Нидерландах, Швеции, Литве, Польше и др. В этих странах статус документов морского пространственного планирования закреплён национальным законодательством и подготовлены соответствующие морские планы [21].

Практически во всех указанных странах разработкой МПП занимаются уполномоченные министерства и ведомства на государственном уровне. Однако в зависимости от делегированных полномочий на региональном уровне также могут быть разработаны морские комплексные планы в границах территориального моря и внутренних морских вод. В качестве примера морского стратегического планирования приведен морской план исключительной экономической зоны Германии в Северном море (рис. 1).

Территория РФ уникальна, включает внутреннее и территориальные воды 13 морей, граничит по морю с такими государствами, как: США, Япония, Северная Корея, Казахстан, Азербайджан, Абхазская Республика, Украина, Литва, Польша Финляндия, Эстония, Норвегия. Протяженность общей береговой линии РФ составляет более 38 тыс. км<sup>11</sup>. При этом около 20 тыс. км побережья приходится на Северный Ледовитый океан (рис. 2).

Из 89 субъектов РФ более 20 имеют выход к морю. Для этих регионов МПП — необходимый инструмент реализации стратегических целей социально-экономического развития.

Приморским регионам, согласно письму Министерства экономического развития РФ от 11.10.2013 № Д17и-904<sup>12</sup>, рекомендовано включение в содержание прибрежно-морского блока стратегий социально-экономического развития схем МПП в целях обеспечения рационального использования побережий и морских акваторий, сбалансированного развития морской деятельности. Однако если территориальное планирование имеет нормативно-правовую и методическую базу, являясь документами стратегической направленности,

<sup>8</sup> Корнеев О.Ю. Первый российский опыт применения процедур морского пространственного планирования в российской части Баренцева моря // Арктика и инновации. 2023. № 1 (1). С. 18–31. URL: <https://www.arcainnov.ru/jour/article/view/6>

<sup>9</sup> Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development.

<sup>10</sup> Ocean Policy to Advance the Economic, Security and Environmental Interests of the United States of America. Executive Order 13840 of 19 June 2018 // Federal Register. 2018. Vol. 83. No. 121. Pp. 20431–29434. URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2018-06-22/pdf/2018-13640.pdf>

<sup>11</sup> Политико-административный и экономико-географический обзор Российской Федерации // История.РФ. URL: <https://histrf.ru/read/articles/politiko-administrativnyy-i-ekonomiko-geograficheskiy-obzor-rossiyskoy-federacii>

<sup>12</sup> Письмо Министерства экономического развития Российской Федерации от 11.10.2013 № Д17и-904. URL: [https://www.glavbukh.ru/npd/edoc/99\\_499055083?ysclid=m74iowfe1p571505839](https://www.glavbukh.ru/npd/edoc/99_499055083?ysclid=m74iowfe1p571505839)

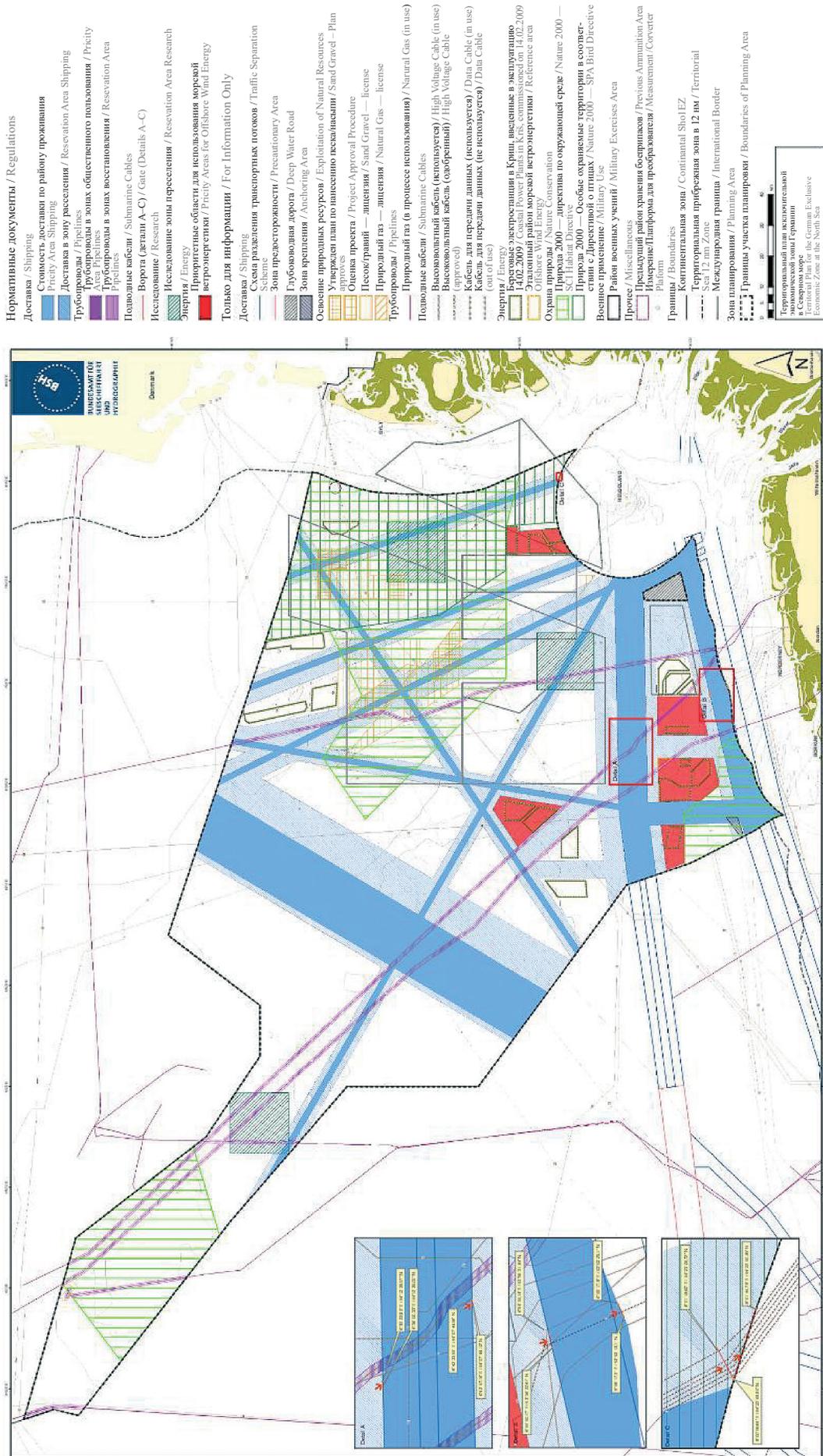


Рис. 1. Морской пространственный план исключительной экономической зоны Германии в Северном море<sup>13</sup>  
 Fig. 1. Spatial Plan for the German Exclusive Economic Zone in the North Sea<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Закон о пространственной организации (нем. Raumordnungsgesetz — ROG) от 22.12.2008 (BGBl. I S. 2986), последняя поправка в статье 124. Положение от 31.08.2015 (BGBl. I S. 1474).

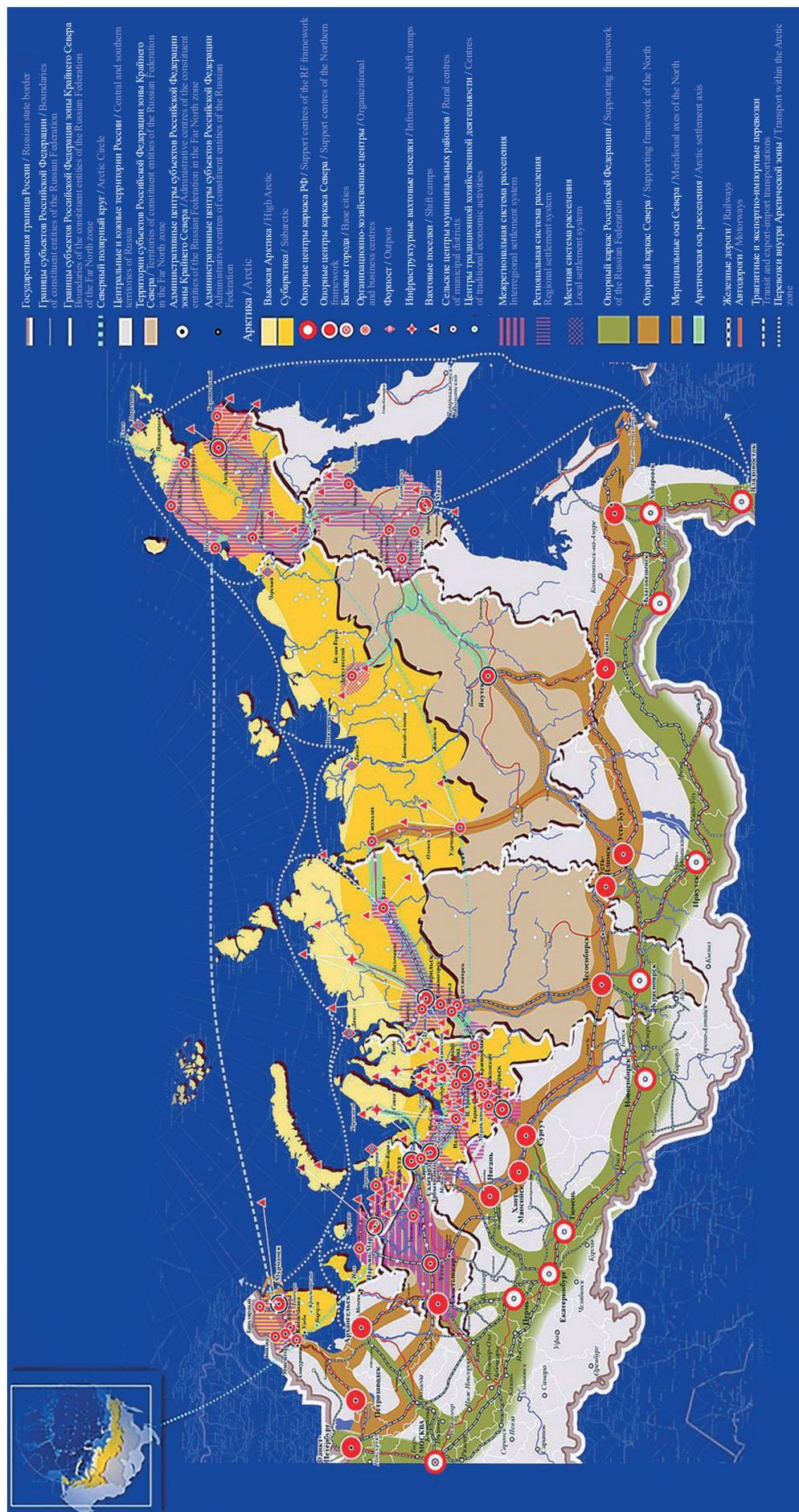


Рис. 2. Морские границы Российской Федерации Арктической зоны<sup>14</sup>  
Fig. 2. The maritime borders of the Russian Federation in the Arctic zone<sup>14</sup>

14 Презентация П.П. Спирина «Стратегия территориальной организации развития Арктической зоны Российской Федерации от 02.05.2014 № 296» «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации».

то морское пространственное планирование как инструмент планирования пока не нашел нормативно-технического применения в России.

Проблема отсутствия в нашей стране правового зонирования морских акваторий приводит к конфликтам между хозяйственным использованием морского пространства и сохранением уникальных экосистем, а также к конфликтам между субъектами морской деятельности. Морское пространственное планирование следует рассматривать как инструмент регулирования размещения на акватории и в прибрежной зоне и развития различных видов морской деятельности. К основным видам морской деятельности, между которы-

ми могут возникнуть конфликтные ситуации, могут быть отнесены: рыболовство и рыбозаводство, судходство, разведка и добыча полезных ископаемых; строительство объектов инженерной инфраструктуры (подводных кабелей и трубопроводов), искусственные сооружения и острова; туризм и рекреация.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

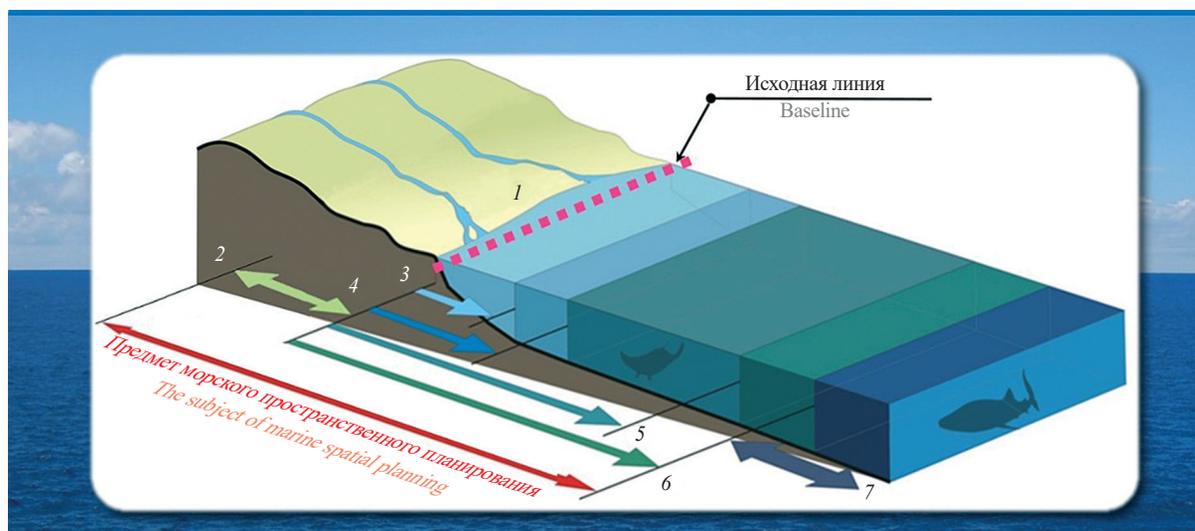
Морское пространственное планирование в настоящем исследовании рассматривается как инструмент реализации стратегических целей пространственного развития. При этом эффективность МПП в части обеспечения устойчивого развития зависит



Рис. 3. Комплексная система документов территориального и морского планирования (разработана автором)<sup>15</sup>

Fig. 3. A comprehensive system of territorial and maritime planning documents, developed by the author<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Тема диссертационного исследования «Проблемы устойчивого развития России в рыночных условиях градостроительной деятельности и пути их решения».



**Рис. 4.** Предмет морского пространственного планирования<sup>16</sup>: 1 — внутренние морские воды; 2 — приморская территория; 3 — территориальные морские воды (до 12 морских миль от исходной линии); 4 — прилежащие воды; 5 — континентальный шельф; 6 — исключительная экономическая зона (до 200 морских миль); 7 — открытое море (открытое морское пространство)

**Fig. 4.** The subject of marine spatial planning<sup>16</sup>: 1 — internal sea waters; 2 — coastal territory; 3 — territorial sea waters (up to 12 nautical miles from the baseline); 4 — adjacent waters; 5 — continental shelf; 6 — exclusive economic zone (up to 200 nautical miles); 7 — open sea (open sea space)

от его совместимости с документами территориального планирования приморских территорий и полномочий ответственных за комплексное развитие органов исполнительной власти приморских регионов РФ.

Таким образом, территориальное планирование и морское планирование должны быть взаимосвязаны и последовательны, тем более что морская деятельность может быть рассмотрена как подсистема регионального хозяйства. Для обеспечения возможности решения территориальных и морских пространственных задач и их взаимосвязи необходимо формирование правовой системы, регулирующей планирование на суше и море (рис. 3). Структура и состав документов МПП определяют последовательность разработки документации, необходимой для регулирования морепользования. При этом требуется координация документов территориального и морского планирования, особенно при размещении инфраструктурных объектов в береговой зоне.

С учетом международного опыта МПП и национальной специфики российскими учеными разработана методическая база морского пространственного планирования как инструмента управления развитием приморских субъектов РФ. Методика была апробирована в пилотном проекте МПП российской части Финского залива Балтийского моря

(Ленинградская область) и юго-восточной Балтики (Калининградская область) [6].

Морской комплексный план в конечном итоге должен быть направлен на разграничение морской акватории по функциональному использованию между различными субъектами морской деятельности и введение природоохранных ограничений для сохранения уникальных морских экосистем. Планирование размещения морских и прибрежных объектов ориентировано на обеспечение системного долгосрочного развития приморских территорий.

Россия располагает определенными правовыми основами, регулируемыми МПП. Это, прежде всего, нормы международного морского права. В Конвенции по морскому праву ООН 1982 г., ратифицированной Россией 12 марта 1997 г.<sup>17</sup>, закреплены основополагающие принципы использования морских пространств и установлены международные компетенции государств в морской деятельности. Предмет морского пространственного планирования в связи с установленными категориями морских пространств имеет довольно сложную структуру (рис. 4).

При разработке методологии МПП большое внимание было уделено вопросам разделения полномочий в области морского пространственного планирования между органами государственной власти РФ, субъек-

<sup>16</sup> Презентация П.П. Спирина «Структура и содержание морских комплексных планов». 2014. URL: <http://www.myshared.ru/slide/952653/>

<sup>17</sup> О ратификации Конвенции Организации Объединенных Наций по морскому праву и Соглашения об осуществлении части XI Конвенции Организации Объединенных Наций по морскому праву : Федеральный закон от 26.02.1997 № 30-ФЗ. URL: <https://base.garant.ru/2540664/>

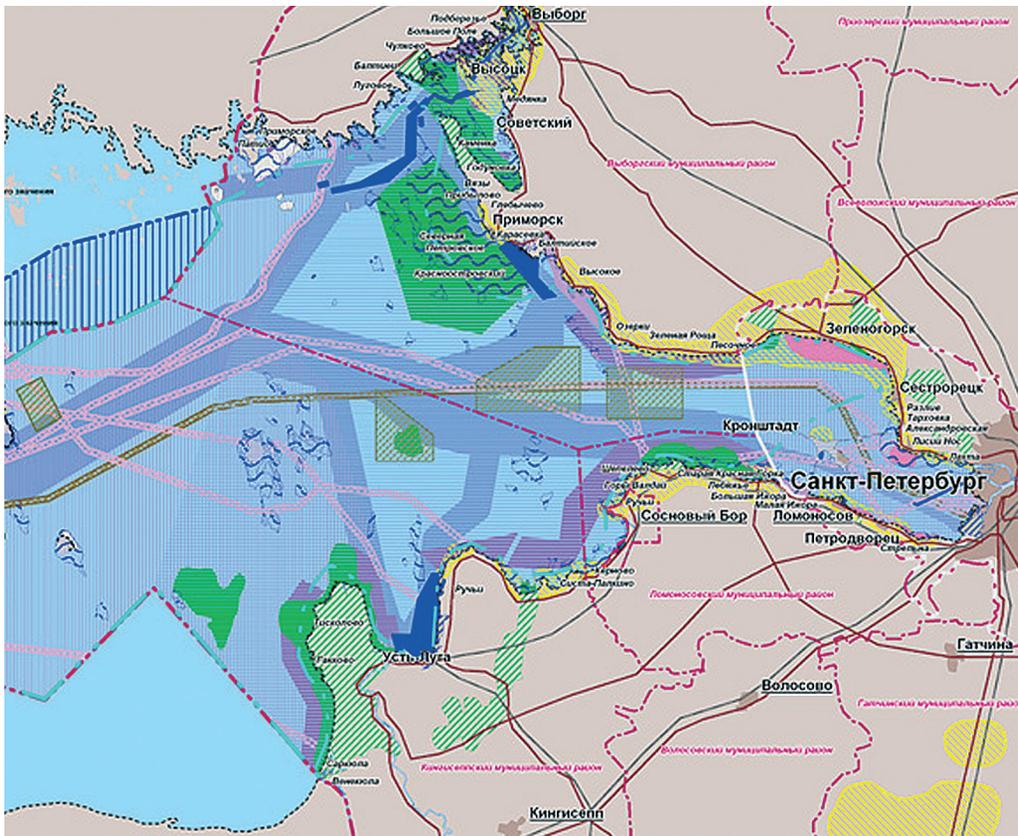


Рис. 5. Комплексная схема функционального зонирования Финского залива Балтийского моря<sup>18</sup>

Fig. 5. Complex scheme of functional zoning of the Gulf of Finland of the Baltic Sea<sup>18</sup>

тами РФ, а также органами местного самоуправления муниципальных образований<sup>6</sup>. При этом следует учитывать, что федеральные интересы распространяются на все морские пространства, на которые распространяются суверенные права и юрисдикция РФ. Региональные интересы и планы по развитию судоходства, рыболовства, подводных инженерных коммуникаций и т.д. могут реализовываться только во внутренних и территориальных водах морей. Муниципальные планы перспективного развития рекреационной, берегозащитной и транспортной инфраструктуры предлагается реализовывать при подготовке документов морского планирования субъектов РФ.

В качестве базового инструмента МПП предлагается функциональное зонирование морской акватории по видам деятельности. В основе определения границ функциональных зон на морских акваториях используются градостроительные принципы территориального планирования<sup>6</sup>, в соответствии с которыми алгоритм зонирования морской акватории может быть представлен следующим образом:

1. Устанавливаются границы морских акваториальных зон определенного функционального использования с учетом современного состояния и перспектив развития, в том числе и отраслевого.

2. Отображаются границы зон с особыми условиями применения морских акваторий.

3. Определяются приоритеты использования и природоохранные ограничения морехозяйственной деятельности.

На рис. 5 в качестве примера представлена комплексная схема функционального зонирования акватории Финского залива, отражающая особенности функционально-планировочной организации морского пространства и приморских территорий Ленинградской области<sup>6</sup>.

В качестве второго примера функционального зонирования морской акватории приведен модельный проект морского плана российской части юго-восточной Балтики (рис. 6) [6]. Особенности объекта планирования заключаются в том, что около половины морского пространства расположено в исключительной экономической зоне, что требует тщательной проработки границ функциональных зон федерального уровня с учетом трансграничных процессов.

В результате научных исследований Научно-исследовательского института перспективного градостроительства (НИИ ПГ, Россия) была выработана методология МПП в части зонирования ак-

<sup>18</sup> Научная разработка НИИ ПГ в рамках работы «Разработка инструментария морского акваториального (пространственного) планирования и предложений по его применению на примере Балтийского моря».

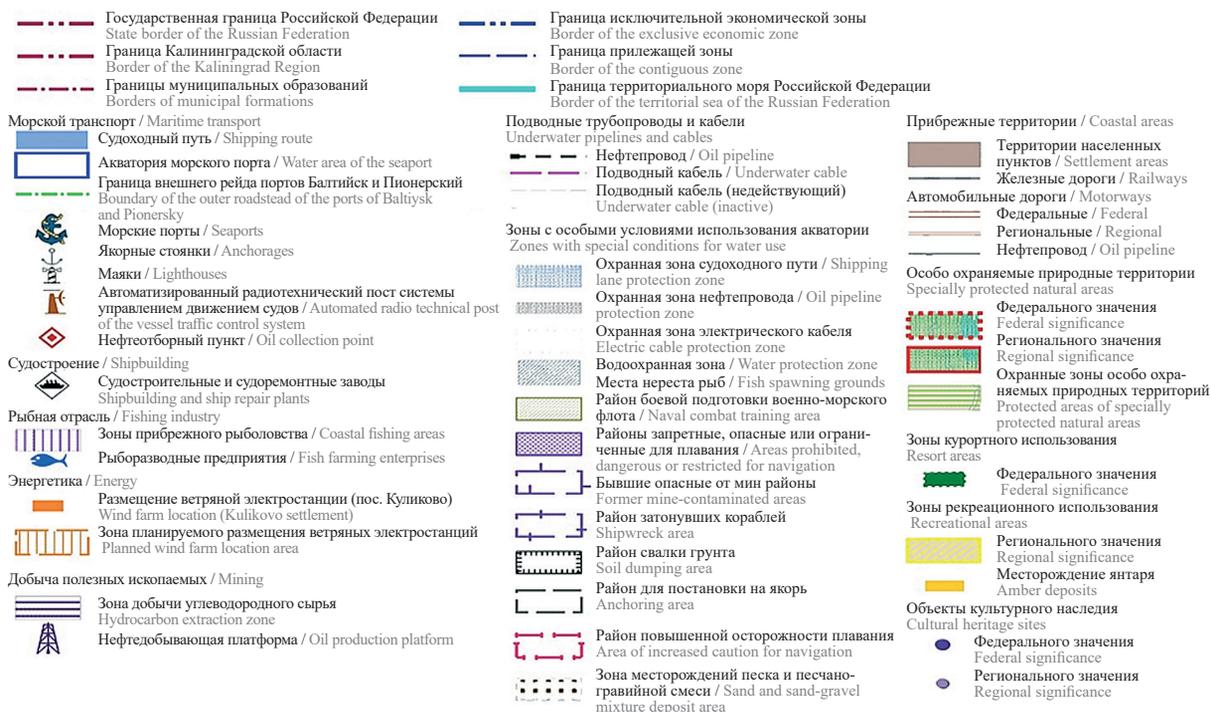
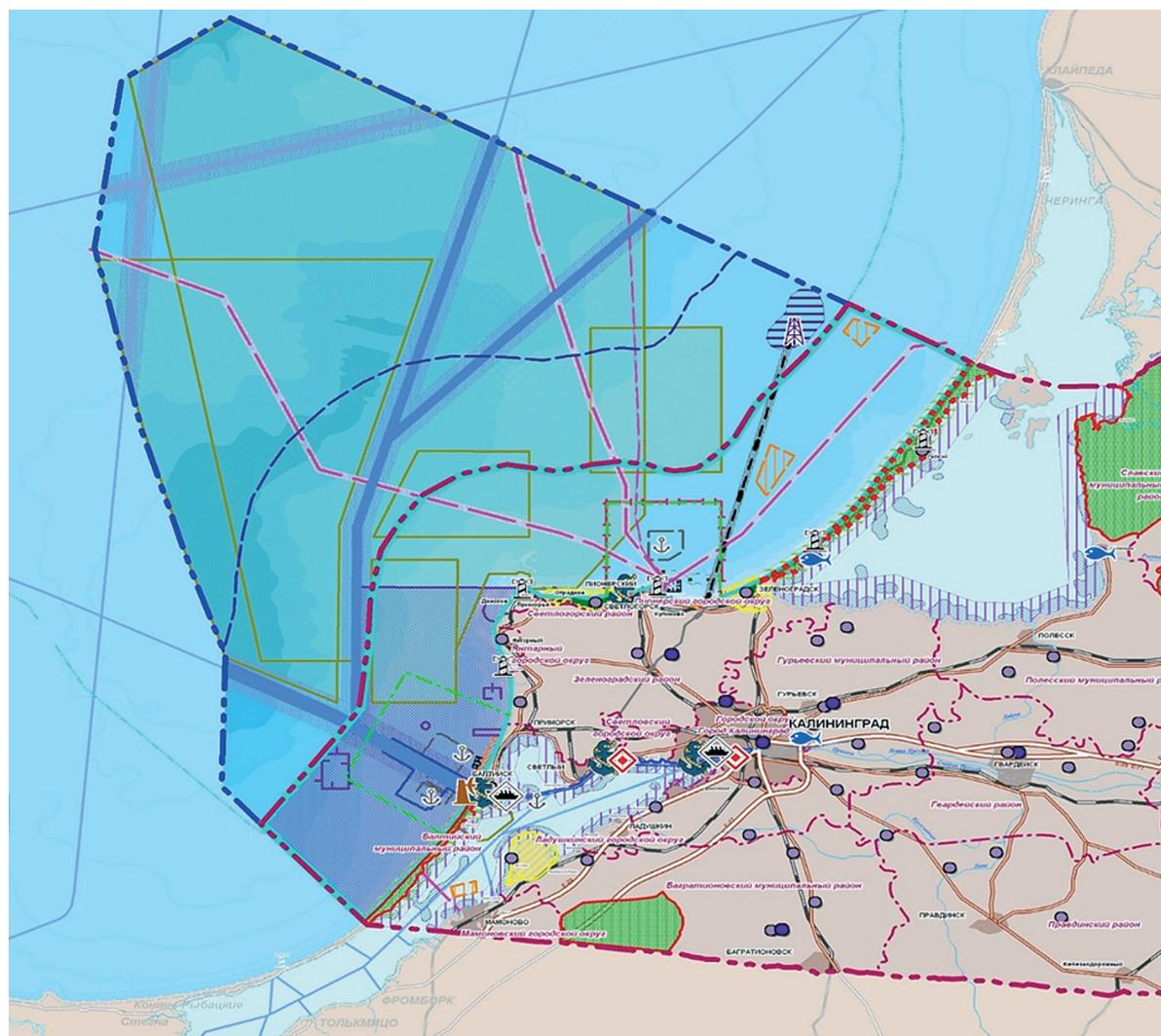


Рис. 6. Модельный проект комплексного морского плана на примере российской части юго-восточной Балтики<sup>15</sup>

Fig. 6. A model draft of a comprehensive marine plan based on the example of the Russian part of the Southeastern Baltic<sup>15</sup>



Рис. 7. Структура документа морского пространственного планирования<sup>15</sup>

Fig. 7. Structure of the marine spatial planning document<sup>15</sup>

ваторий, что дало возможность определить принципы планирования в части разграничения морского пространства по критерию преимущественного использования [10]. Результатом исследований стали методические рекомендации по применению в том числе эколого-ориентированного подхода в морском планировании, а также рекомендации по структуре документов, необходимых для внедрения морского планирования в отечественную практику пространственного планирования.

Методология и структура морского комплексного плана основаны на преемственности принципов, методов и подходов территориального планирования, что свидетельствует о целесообразности объединения прибрежных акваторий и приморских территорий в единый объект управления (рис. 7).

В Морской доктрине Российской Федерации отмечается: «Развитие морской деятельности и морского потенциала, особенно в регионах Арктической зоны, являются одним из стратегических приоритетов социально-экономического развития Российской Федерации в XXI веке»<sup>19</sup>. Этим документом Северному морскому пути (СМП) отводится роль «национальной транспортной коммуникации, конкурентоспособной на мировом рынке». Как национальная транспортная коммуникация, СМП требует создания и развития береговой инфраструк-

туры, обоснования размещения инфраструктурных объектов в береговой зоне и, как следствие, разработки градостроительной документации, необходимой для осуществления строительства. Развитие инструментария морского планирования и разработка комплекта документов на акваторию морей Северного Ледовитого океана необходимы для обеспечения условий для регулирования и взаимоувязывания различных видов морской деятельности, в том числе развития инфраструктуры СМП, сохранения биоразнообразия арктических морей и охраны окружающей среды при строительстве подводных и надводных сооружений.

Морское пространственное планирование и документы территориального планирования регионов Арктики должны стать основой пространственного планирования Арктической зоны Российской Федерации, обеспечивая условия для комплексного развития морских портов и судоходных путей в акваториях арктических морей<sup>20</sup>. Пространственное отображение стратегических направлений развития арктических территорий европейской части РФ представлено на рис. 8.

Важным аспектом планирования использования арктических акваторий и территорий России является освоение минерально-сырьевых ресурсов континентального шельфа Северного Ледовитого

<sup>19</sup> Об утверждении Морской доктрины Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 31.07.2022 № 512 (в ред. Указа Президента Российской Федерации от 13.08.2024 № 691). URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/48215>

<sup>20</sup> О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года : Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2020 № 645 (в ред. Указов Президента Российской Федерации от 12.11.2021 № 651, от 27.02.2023 № 126). URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45972>

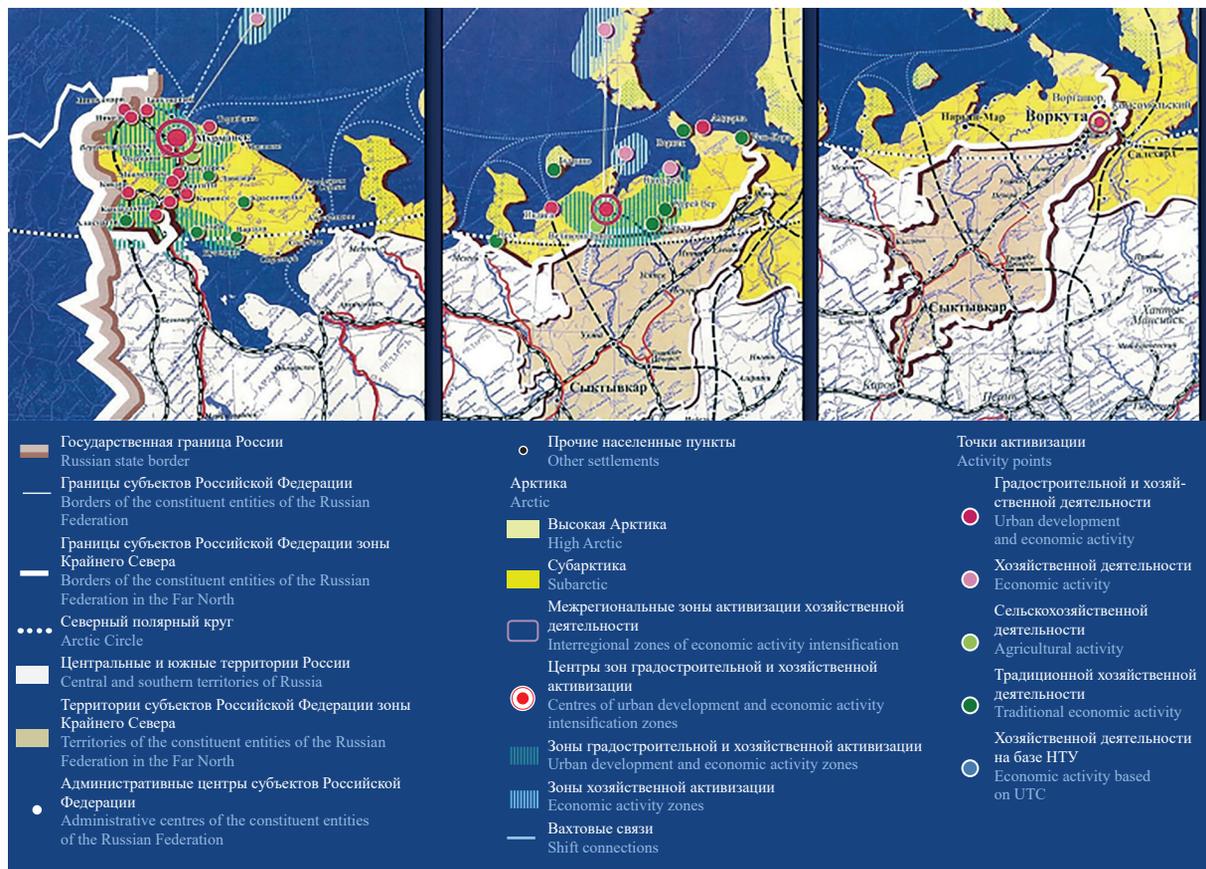


Рис. 8. Арктические территории европейской части Российской Федерации<sup>10</sup>

Fig. 8. Arctic territories of the European part of the Russian Federation<sup>10</sup>

океана. Разработка морских углеводородных месторождений, технологических схем их освоения должна основываться на документах МПП, координирующих действия субъектов морской деятельности в области разведки и добычи полезных ископаемых, судоходства, рыболовства, сохранения экологических систем морей Северного Ледовитого океана. Однако в настоящее время эти виды морской деятельности регулируются отдельными отраслевыми программами и нормативными актами, которые учитывают интересы только одного из ведомств, в связи с чем нередко возникают конфликты по использованию того или иного участка акватории или побережья для размещения объектов береговой инфраструктуры (рис. 9) [7].

Таким образом, проблема размещения морских инфраструктурных объектов нефтегазодобывающей отрасли, в том числе на континентальном шельфе, и взаимодействия субъектов морской деятельности требуют комплексного подхода к планированию использования ресурсов моря и регулированию техногенной нагрузки на морскую среду. В рамках пространственного планирования определяются приоритеты видов использования и условия совместного осуществления таких видов деятельности, как добыча углеводородного сырья, рыболовство, морской транспорт, природоохранная деятельность.

Стратегически важное значение для социально-экономического развития и обеспечения национальной безопасности РФ имеет также и Тихоокеанское региональное направление<sup>16</sup>. Приоритетами национальной морской политики на этом направлении являются:

- преодоление экономической и инфраструктурной изоляции Дальнего Востока от промышленных развитых регионов РФ;
- обеспечение согласованного развития основных морских транспортных и логистических узлов, в том числе морских портов национального, регионального и местного значения, интеграция Дальнего Востока в экономическое пространство Азиатско-Тихоокеанского региона [13].

Градостроительное развитие и исторический опыт хозяйственного освоения приморских территорий Дальнего Востока показывают, что для этого региона характерны сложные пространственные структуры, связанные с трансграничными морскими акваториями. Но именно здесь, в городском округе Владивосток, имеющем приморское и приграничное положение, планируется создание инновационного центра устойчивого развития территории — нового города Спутник на побережье Амурского залива Японского моря. Градостроительные условия создания нового города: переход к комплексному пла-

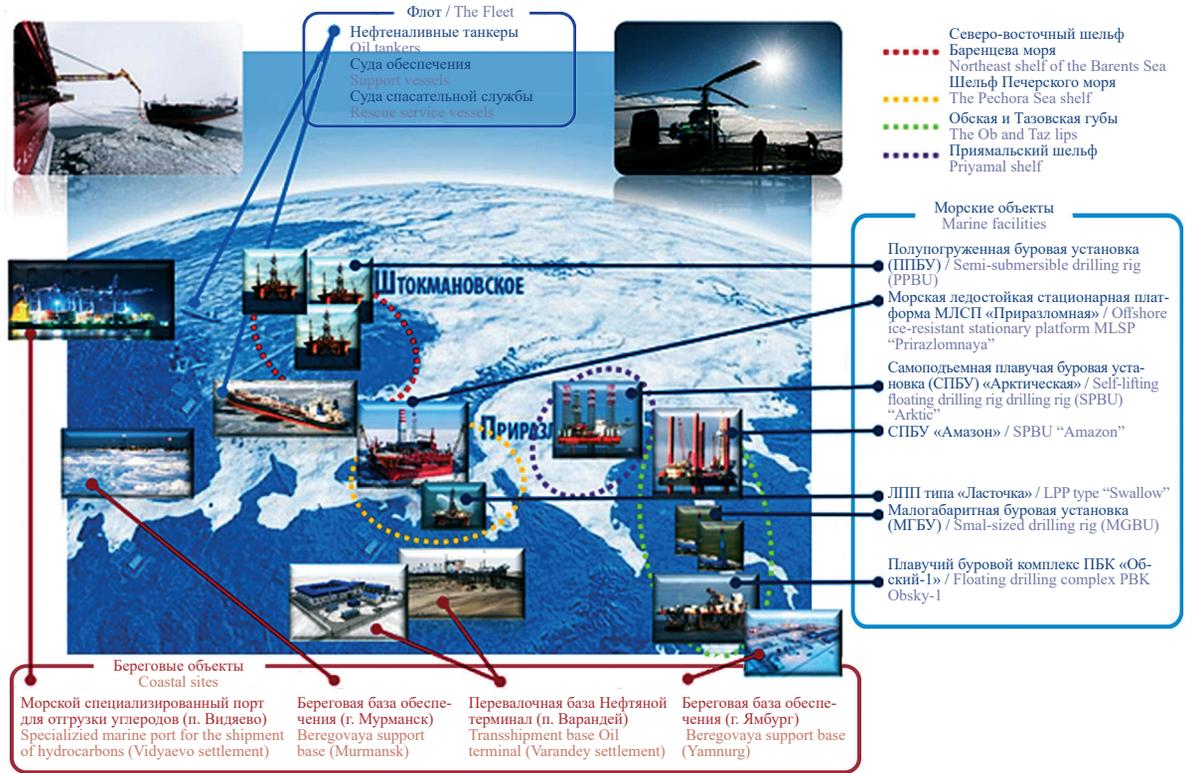
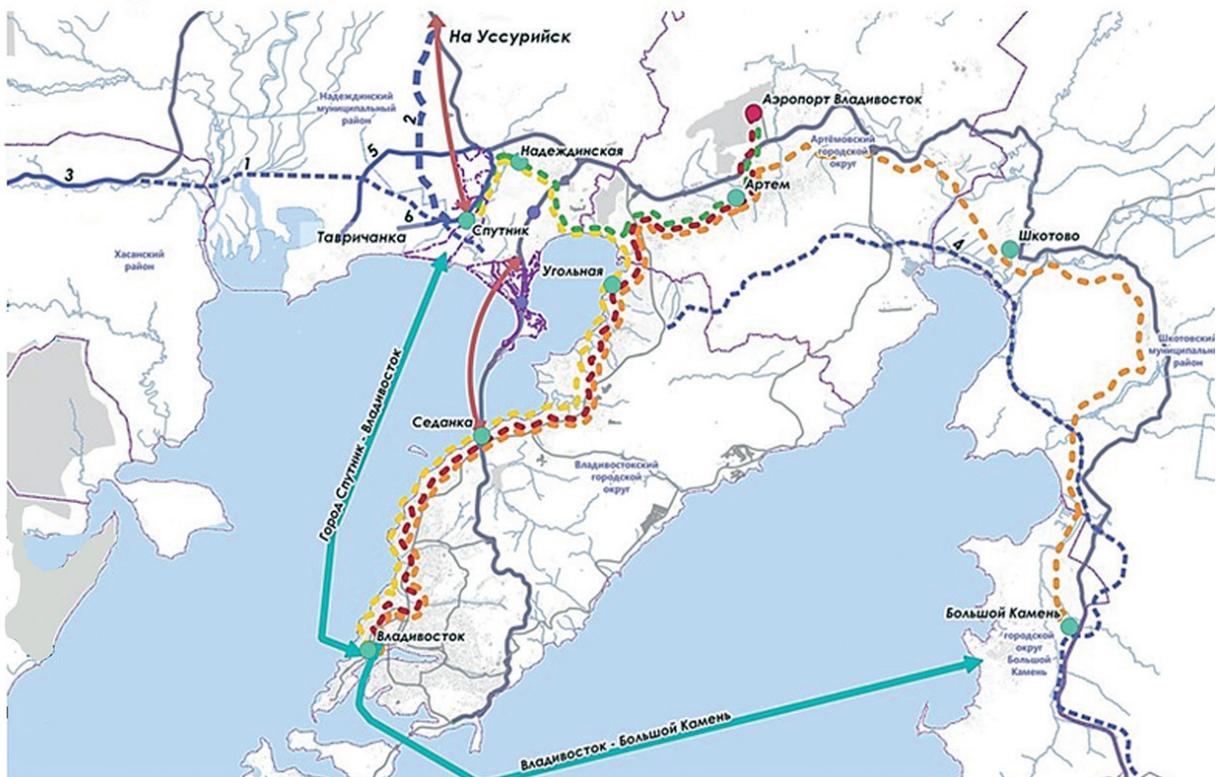


Рис. 9. Распределение береговых и морских инфраструктурных объектов на арктическом шельфе Российской Федерации<sup>21</sup> [10]

Fig. 9. Distribution of onshore and offshore infrastructure facilities on the Arctic shelf of the Russian Federation<sup>21</sup> [10]

Схема перспективных агломерационных связей  
The scheme of promising agglomeration links



## Мероприятия по развитию транспорта Events on the development of transport

- **Развитие железнодорожного транспорта:**  
Railway transport development:
    1. Строительство ж/д линии Вольно-Надеждинское – город Спутник.  
Construction of the railway line Volno-Nadezhdinskoe – The city of Sputnik.
    2. Развитие системы городской электрички по направлениям:  
Development of the city train system in the following directions:
      - Спутник – Владивосток / Sputnik – Vladivostok;
      - Спутник – Артем – аэропорт / Sputnik – Artyom – airport;
      - Владивосток – Артем – аэропорт  
Vladivostok – Artyom airport;
      - Владивосток – Артем – Большой Камень / Vladivostok – Artyom is A Big Stone
  - **Ключевые мероприятия по развитию УДС:**  
Key measures for the development of UDS:
    1. Строительство автодороги в Хасанский район.  
Construction of a highway to Khasansky district.
    2. Подключение города Спутника к федеральной автодорожной сети.  
Connecting the Satellite city to the federal highway network.
    3. Реконструкция дороги Раздольное – Хасан.  
Reconstruction of Razdolnoye – Khasan road.
    4. Новая магистраль Владивосток – Находка.  
The new Vladivostok – Nakhodka highway.
    5. Реконструкция дороги на Тавричанку.  
Reconstruction of the road to Tavrichanka.
    6. Реконструкция дороги на Давыдовку.  
Reconstruction of the road to Davydovka.
    7. Дополнительные развязки на автодороге «Новый – Де Фриз – Седанка».  
Additional interchanges on the highway Novy – De Vries – Sedanka.
  - **Экспрессное автобусное сообщение:**  
Express bus service:
    - город Спутник – Седанка;  
The city of Sputnik – Sedanka;
    - город Спутник – Уссурийск  
Sputnik City – Ussuriysk
  - **Новые маршруты морского транспорта:**  
New sea transport routes:
    - Владивосток – город Спутник;  
Vladivostok is a satellite city;
    - Владивосток – Большой Камень  
Vladivostok Is A Big Stone
  - Транспортно-пересадочные узлы:**  
Transportation hubs:  
Город Спутник, Надеждинская, Артем, Угольная, Седанка, Центр Владивостока, Шкотово, Большой Камень  
Sputnik city, Nadezhdinskaya, Artyom, Ugolnaya, Sedanka, Vladivostok city center, Shkotovo, Bolshoy Kamen
- 
- |  |   |  |
|--|---|--|
|  Границы города Спутника<br>Borders of the satellite city |  Маршруты морского транспорта<br>Sea transport routes    |  Спутник – Владивосток<br>Sputnik – Vladivostok                             |
|  Аэропорт<br>An airport                                   |  Маршруты экспресс-автобусов<br>Express bus routes       |  Спутник – Артем – аэропорт<br>Sputnik – Artyom – airport                   |
|  ТПУ<br>TPU   |  Реконструкция УДС<br>Reconstruction of the road network |  Владивосток – Артем – аэропорт / Vladivostok – Artyom airport              |
|  Транспортная развязка<br>Transport interchange           |  Строительство УДС<br>Construction of a road network     |  Владивосток – Артем – Большой Камень<br>Vladivostok – Artyom – A Big Stone |

Рис. 10. Новый город Спутник. Развитие прибрежной акватории Амурского залива Японского моря<sup>22</sup>

Fig. 10. The new Satellite city. Development of the coastal waters of the Amur Bay of the Sea of Japan<sup>22</sup>

нированию приморских территорий и прибрежных акваторий; обеспечение экологической безопасности морской среды, сохранения и восстановления морских экосистем; формирование прибрежных рекреационных зон; развитие морского транспорта, сопряженного с береговой инфраструктурой; экономическое развитие и качество жизни населения нового города на побережье Амурского залива, что также напрямую связано с морской деятельностью (рис. 10).

Создание и развитие нового города на побережье Амурского залива тесно связано с морской инфраструктурой и является идеальной площадкой для пилотного проекта морского комплексного плана, реализующего методологию МПП.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При непрерывном возрастании роли морского пространства страны как области пересечения политических, экономических, оборонных, научных, экологических интересов в России возникла необходимость стратегического управления использованием морского пространства и береговой зоны, регулирования пространственного разграничения видов морской деятельности посредством документов МПП.

Для рационального использования морского потенциала приморских регионов необходимо

включение в систему стратегического планирования документов МПП, сопряженных со схемами территориального планирования субъектов РФ, отраслевыми программами развития морских видов деятельности.

В России до настоящего времени не создана нормативная правовая база МПП. Однако научные исследования в этом направлении ведутся. С учетом международного опыта и национальной специфики страны сформированы методические подходы к МПП как инструменту управления развитием приморских субъектов РФ. Инструментарий МПП был апробирован в пилотном проекте морского пространственного планирования российской части Финского залива Балтийского моря (Ленинградская область) и юго-восточной Балтики.

Дальнейшие исследования в этой области направлены на разработку нормативно-правовой базы морского планирования.

Во всех отраслевых законах, касающихся морской и иных видов деятельности, приоритетных для приморских регионов, следует установить пространственные границы действия правовых норм и указать субъекты правоотношений, а также их полномочия. Также важно определение ответственного органа исполнительной власти за морское пространственное планирование.

<sup>21</sup> Спирин П.П., Сутряджина Т.Г. Роль и значение морского пространственного планирования в стратегическом развитии Арктической зоны Российской Федерации // Экономика и управление. 2015. № 12 (122). С. 10–14.

<sup>22</sup> Презентация П.П. Спирина «Стратегия социально-экономического и пространственного развития. Документация по планировке территории на земельные участки (включая предпроектную документацию) города-спутника Владивостока». 2022.

Принятие Федерального закона «О морском пространственном планировании» является необходимым условием внедрения в практику стратегического планирования принципов и методов МПП.

Дальнейшее законодательное развитие в области МПП в России, а также практическое при-

менение соответствующих методических рекомендаций обеспечат возможность снижения или устранения геостратегических вызовов, устранения межотраслевой несогласованности видов морской деятельности и создадут условия для устойчивого развития.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Митягин С.Д. Морское планирование — новое направление пространственной организации Российской Федерации // Вестник. Зодчий. 21 век. 2012. № 4 (45). С. 004–007. EDN PWSVFX.

2. Rudd M.A., Dickey-Collas M., Ferretti J., Johannessen E., Macdonald N.M., McLaughlin R. et al. Ocean Ecosystem-Based Management Mandates and Implementation in the North Atlantic // Frontiers in Marine Science. 2018. Vol. 5. DOI: 10.3389/fmars.2018.00485

3. Шавыкин А.А., Карнатов А.Н. Предложения в проект свода правил по инженерно-экологическим изысканиям для строительства. Карты уязвимости районов при оценке воздействия на окружающую среду для шельфовых проектов // Инженерно-экологические изыскания — нормативно-правовая база, современные методы и оборудование : мат. Общеросс. науч.-практ. конф. 2020. С. 130–137. EDN WPBXTG.

4. Спиридонов В.А., Соловьев Б.А., Платонов Н.Ф., Чернова Н.В., Шнак О.В., Соловьева М.А. и др. Компоненты биологического разнообразия для пан-арктического планирования сети морских районов, приоритетных для охраны и мониторинга // Морские исследования и образование (MARESEDU-2019) : тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 239–242. EDN BUEPJS.

5. Гогоберидзе Г.Г., Косьян А.Р., Румянцева Е.А., Косьян Р.Д. Пространственное планирование как инструмент устойчивого морского и берегового природопользования в Краснодарском крае // География и природные ресурсы. 2021. Т. 42. № 3. С. 106–112. DOI: 10.15372/GIPR20210311. EDN BWUGFX.

6. Мякинников В.М., Спирин П.П., Вязилова Ю.С. Модельная структура и содержание комплексного морского плана на примере Калининградской области // Балтийский регион. 2015. № 3 (25). С. 76–89. DOI: 10.5922/2074-9848-2015-3-5. EDN UIJMBT.

7. Спирин П.П., Супрядкина Т.Г. Роль и значение морского пространственного планирования в стратегическом развитии // Экономика и управление. 2015. № 12 (122). С. 10–17. EDN VKWWEF.

8. Zaucha J. The key to governing the fragile Baltic Sea. Maritime Spatial Planning in Baltic Region and Way Forward. Riga, 2014.

9. Zaucha J., Gee K. Maritime Spatial Planning. Springer, 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-98696-8

10. Luttmann A., Darr A., Vyazilova Y., Spirin P. Umweltverträgliche Raumnutzungskonzepte für den Ostseeküstenraum der Russischen Föderation (MSP-Rus), Phase 2: Umweltbewertung bei der maritimen Raump lanung in der Russischen Föderation unter Anwendung und Erprobung in der Pilotregion. Umweltbundesamt. Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), Dresden, 2016.

11. Mayboroda V.A., Spirin P.P. Legal Regulation in The Field of Territorial Planning and Urban Zoning: Main Problems and Ways to Solve Them // Journal of Law and Sustainable Development. 2023. Vol. 11. Issue 1. P. e0254. DOI: 10.37497/sdgs.v11i1.254. EDN RRVSRV.

12. Spirin P.P., Mayboroda V.A. Modern urban development policy: normative regulation // Cuestiones Políticas. 2022. Vol. 40. Issue 72. Pp. 823–841. DOI: 10.46398/cuestpol.4072.50. EDN HYPLDA.

13. Бакланов П.Я. Морское пространственное планирование: теоретические и методические аспекты // Геосистемы в Северо-Восточной Азии. Типы, современное состояние и перспективы развития : сб. науч. ст. 2018. С. 580–585. EDN YXLUBT.

14. Бакланов П.Я. Морское пространственное планирование: теоретические аспекты // Балтийский регион. 2018. Т. 10. № 2. С. 76–85. DOI: 10.5922/2079-8555-2018-2-5. EDN XSFRJZ.

15. Sereda A.V., Mikhaylichenko Y.G., Baklanov P.Y., Kachur A.N., Lappo A.D., Danilova L.V. Contribution of an integrated maritime policy to the dialogue of civilisations: The Asia-pacific case // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. Issue 6. DOI: 10.3390/jmse9060610. EDN HCALLW.

16. Качур А.Н., Бакланов П.Я., Михайличенко Ю.Г., Середва А.В., Масленников С.И. О развитии общей системы интегрированного (комплексного) управления морским природопользованием // Проблемы региональной экологии. 2020. № 2. С. 101–108. DOI: 10.24411/1728-323X-2020-12101. EDN KGCCOH.

17. Денисов В.В., Михайличенко Ю.Г. Актуальные проблемы управления морским природопользованием (на примере Баренцева моря) // Региональная экология. 2017. № 3 (49). С. 5–16. EDN ZWTLAR.

18. Kidd S., Calado H., Gee K., Gilek M., Saunders F. Marine Spatial Planning and sustainability: Examining the roles of integration — Scale, policies,

stakeholders and knowledge // *Ocean & Coastal Management*. 2020. Vol. 191. P. 105182. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105182. EDN HWRKEU.

19. Wright G., Gjerde K.M., Johnson D.E., Finkelstein A., Ferreira M.A., Dunn D.C. et al. Marine spatial planning in areas beyond national jurisdiction // *Marine Policy*. 2021. Vol. 132. P. 103384. DOI: 10.1016/j.marpol.2018.12.003. EDN QYNNXN.

Поступила в редакцию 12 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 12 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 13 мая 2025 г.

**ОБ АВТОРЕ:** Павел Павлович Спири́н — кандидат географических наук, директор, академик РААСН; Научно-исследовательский институт перспективного градостроительства (НИИ ПГ); 191186, г. Санкт-Петербург, ул. Итальянская, д. 4; старший научный сотрудник; Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (ЦНИИП Минстроя России); 119331, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 29; РИНЦ ID: 600613, Scopus: 57223701254; pavelsp@list.ru.

## REFERENCES

- Mityagin S.D. Marine planning — a new direction of spatial organization of the Russian Federation. *Bulletin. Zodchiy. 21st century*. 2012; 4(45):004-007. EDN PWSVFX. (rus.).
- Rudd M.A., Dickey-Collas M., Ferretti J., Johannesen E., Macdonald N.M., McLaughlin R. et al. Ocean Ecosystem-Based Management Mandates and Implementation in the North Atlantic. *Frontiers in Marine Science*. 2018; 5. DOI: 10.3389/fmars.2018.00485
- Shavykin A.A., Karnatov A.N. Proposals for the draft code of practice for engineering and environmental surveys for construction. Area vulnerability maps for environmental impact assessment for offshore projects. *Engineering and environmental surveys — regulatory framework, modern methods and equipment: materials of the All-Russian scientific and practical conference*. 2020; 130-137. EDN WPBXTG. (rus.).
- Spiridonov V.A., Soloviev B.A., Platonov N.F., Chernova N.V., Shpak O.V., Solovteva M.A. et al. Components of biological diversity for pan-Arctic planning of a network of marine areas of priority for protection and monitoring. *Marine Research and Education (MARESEDU-2019) : Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference*. 2019; 239-242. EDN BUEPJS. (rus.).
- Gogoberidze G.G., Kosyan A.R., Rummyantseva E.A., Kosyan R.D. Spatial planning as a tool for sustainable marine and coastal nature management in the Krasnodar Territory. *Geography and Natural Resources*. 2021; 42(3):106-112. DOI: 10.15372/GIPR20210311. EDN BWUGFX. (rus.).
- Myakinenkov V., Spirin P., Vyazilova Ju. Model structure and content of a comprehensive maritime plan: the case of Kaliningrad. *Baltic Region*. 2015; 3(25):76-89. DOI: 10.5922/2074-9848-2015-3-5. EDN UIJMBT. (rus.).
- Spirin P.P., Syryadkina T.G. Importance of spatial planning in the strategic development of the Russian Federation's arctic region. *Economics and Management*. 2015; 12(122):10-17. EDN VKWWEF. (rus.).
- Zaucha J. *The key to governing the fragile Baltic Sea. Maritime Spatial Planning in Baltic Region and Way Forward*. Riga, 2014.
- Zaucha J., Gee K. *Maritime Spatial Planning*. Springer, 2019. DOI: 10.1007/978-3-319-98696-8
- Luttmann A., Darr A., Vyazilova Y., Spirin P. *Umweltverträgliche Raumnutzungskonzepte für den Ostseeküstenraum der Russischen Föderation (MSP-Rus), Phase 2: Umweltbewertung bei der maritimen Raumplanung in der Russischen Föderation unter Anwendung und Erprobung in der Pilotregion. Umweltbundesamt. Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), Dresden, 2016.*
- Mayboroda V.A., Spirin P.P. Legal Regulation in The Field of Territorial Planning and Urban Zoning: Main Problems and Ways to Solve Them. *Journal of Law and Sustainable Development*. 2023; 11(1):e0254. DOI: 10.37497/sdgs.v11i1.254. EDN RRVSRV.
- Spirin P.P., Mayboroda V.A. Modern urban development policy: normative regulation. *Cuestiones Políticas*. 2022; 40(72):823-841. DOI: 10.46398/cuestpol.4072.50. EDN HYPLDA.
- Baklanov P.Ya. Marine spatial planning: theoretical and methodological aspects. *Geosystems in North-East Asia. Types, current state and development prospects : collection of scientific articles*. 2018; 580-585. EDN YXLUBT. (rus.).

14. Baklanov P.Ya. Marine spatial planning: theoretical aspects. *Baltic Region*. 2018; 10(2):76-85. DOI: 10.5922/2079-8555-2018-2-5. EDN XSFRJZ. (rus.).

15. Sereda A.V., Mikhaylichenko Y.G., Baklanov P.Y., Kachur A.N., Lappo A.D., Danilova L.V. Contribution of an integrated maritime policy to the dialogue of civilisations: The Asia-pacific case. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021; 9(6). DOI: 10.3390/jmse9060610. EDN HCALLW.

16. Kachur A.N., Baklanov P.Ya., Mikhaylichenko Yu.G., Sereda A.V., Maslennikov S.I. On the development of the general system of the integrated ecosystem-based marine management. *Regional Environmental Issues*. 2020; 2:101-108. DOI: 10.24411/1728-323X-2020-12101. EDN KGCCOH. (rus.).

17. Denisov V.V., Mikhaylichenko Yu.G. Current problems of marine nature use management (the Barents sea case). *Regional Ecology*. 2017; 3(49):5-16. EDN ZWTLAR. (rus.).

18. Kidd S., Calado H., Gee K., Gilek M., Saunders F. Marine Spatial Planning and sustainability: Examining the roles of integration — Scale, policies, stakeholders and knowledge. *Ocean & Coastal Management*. 2020; 191:105182. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105182. EDN HWRKEU.

19. Wright G., Gjerde K.M., Johnson D.E., Finkelshtein A., Ferreira M.A., Dunn D.C. et al. Marine spatial planning in areas beyond national jurisdiction. *Marine Policy*. 2021; 132:103384. DOI: 10.1016/j.marpol.2018.12.003. EDN QYNNXN.

20. Ehler C.N. *A Guide to Evaluating Marine Spatial Plans*. United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization, 2014.

21. Santos C.F., Ehler C.N., Agardy T., Andrade F., Orbach M.K., Crowder L.B. Marine Spatial Planning. *World Seas: An Environmental Evaluation*. 2019; 571-592. DOI: 10.1016/b978-0-12-805052-1.00033-4

Received March 12, 2025.

Adopted in revised form on May 12, 2025.

Approved for publication on May 13, 2025.

**B I O N O T E S :** **Pavel P. Spirin** — Candidate of Geographical Sciences, Director, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Scientific Research Institute of Perspective Urban Development (НИ ПГ)**; 4 Italianskaya st., Saint Petersburg, 191186, Russian Federation; senior research fellow; **Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation**; 29 Vernadskogo avenue, Moscow, 119331, Russian Federation; ID RSCI: 600613, Scopus: 57223701254; pavelsp@list.ru.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.07

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1017-1029

## Динамическое гашение колебаний конструкций высотных зданий ствольно-подвесного типа при сейсмических воздействиях

Илья Владимирович Свитлик<sup>1</sup>, Татьяна Александровна Белаш<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет;  
г. Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Ствольно-подвесные здания обладают рядом важных конструктивных особенностей, заключающихся в повышенной гибкости их несущих элементов. Это может быть использовано для снижения сейсмической нагрузки на конструкции высотных зданий. Однако технические сложности возведения, а также методы расчета, не позволявшие получить данные о поведении подвесных конструкций при сейсмическом воздействии, послужили препятствием для применения ствольно-подвесной системы при строительстве высотных зданий. Другим подходом к обеспечению сейсмической защиты высотных зданий является устройство динамических гасителей колебаний. Подвесные конструкции в зданиях с несущим стволем потенциально могут выполнять роль динамических гасителей колебания. Современные методы расчета математических моделей дают возможность проверить это предположение. Представлено новое конструктивное решение ствольно-подвесного здания, а также дана оценка влияния инженерных параметров подвешенной части здания на его сейсмостойкость.

**Материалы и методы.** Численное моделирование зданий с предлагаемым конструктивным решением в условиях сейсмического воздействия выполнено в программном комплексе ЛИРА во временной области в шаговой нелинейной постановке. Эффективность применения рассматриваемого конструктивного решения здания оценивается на основе данных о перемещениях и ускорениях несущих конструкций при сейсмическом воздействии.

**Результаты.** Обнаружены закономерности влияния величины продольной жесткости упругих связей и массы верхнего подвешенного блока этажей на перемещения и ускорения несущих конструкций здания. На основе сравнительного анализа сведений о деформированном состоянии сооружения в ходе сейсмического воздействия определены оптимальные параметры подвешенных конструкций, позволяющие снизить колебания всего здания.

**Выводы.** Изменение массы подвешенных этажей и жесткости связей между элементами ствольно-подвесного здания может привести к снижению перемещений и ускорений несущих конструкций, гашению колебаний системы. Дальнейшие исследования могут быть посвящены аналитическому определению оптимальных параметров подвешенных конструкций, обеспечивающих восприятие и рассеивание колебательной энергии сейсмического воздействия.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** высотные здания, подвесные конструкции, динамические гасители колебаний, сейсмические воздействия, численное моделирование

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Свитлик И.В., Белаш Т.А. Динамическое гашение колебаний конструкций высотных зданий ствольно-подвесного типа при сейсмических воздействиях // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 1017–1029. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1017-1029

Автор, ответственный за переписку: Илья Владимирович Свитлик, svitlik.i@yandex.ru.

## Dynamic damping of vibrations of structures of high-rise buildings of trunk-suspension type under seismic effects

Ilya V. Svitlik<sup>1</sup>, Tatiana A. Belash<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);  
Saint Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup> Research Center "Construction"; Moscow, Russian Federation;

### ABSTRACT

**Introduction.** Suspended buildings with rigid core have a number of important design features, which consist in increased flexibility of their load-bearing elements. This can be used to reduce the seismic load on the structures of high-rise buildings. However, the technical difficulties of construction, as well as calculation methods that did not allow receiving data on the be-

behaviour of suspended structures under seismic impact, served as an obstacle to the use of this system in the construction of high-rise buildings. Another approach to providing seismic protection for high-rise buildings is the installation of dynamic absorbers. Suspended structures in buildings with a rigid core can potentially act as dynamic absorbers. Modern methods of calculating mathematical models allow us to verify this assumption. This paper presents a new design solution for a suspended building with a rigid core, as well as an assessment of the influence of engineering parameters of the suspended part of the building on its seismic resistance.

**Materials and methods.** Numerical modelling of buildings with the proposed design solution under seismic impact was performed in the LIRA software package in a stepwise nonlinear setting. The effectiveness of the considered structural solution of the building is evaluated on the basis of data on the movements and accelerations of load-bearing structures under seismic impact.

**Results.** The patterns of the influence of the longitudinal stiffness of elastic links and the mass of the upper suspended block of floors on the displacement and acceleration of load-bearing structures of the building were found. A comparative analysis of deformation state of the structure during seismic action was performed, the optimal parameters of suspended structures were determined, allowing to reduce vibrations of the entire building.

**Conclusions.** A change in the mass of suspended floors and the rigidity of the connections between the elements of suspended building can lead to a decrease in displacements and accelerations of structures and damping system vibrations. Further research can be devoted to the analytical determination of the optimal parameters of suspended structures that ensure the dispersion of seismic action energy.

**KEYWORDS:** high-rise buildings, suspended structures, dynamic absorbers, seismic impacts, numerical modelling

**FOR CITATION:** Svitlik I.V., Belash T.A. Dynamic damping of vibrations of structures of high-rise buildings of trunk-suspension type under seismic effects. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):1017-1029. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1017-1029 (rus.).

*Corresponding author:* Ilya V. Svitlik, svitlik.i@yandex.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Несущие системы высотных зданий различаются по способу передачи нагрузки от перекрытий к фундаменту. В зданиях ствольной конструктивной системы ядро жесткости является основной несущей конструкцией, воспринимающей все вертикальные и горизонтальные нагрузки. Одна из разновидностей данной системы — ствольно-подвесная система, которой присуща передача нагрузки от перекрытий к стволу при помощи растянутых элементов. На рис. 1 показаны здания, в которых была воплощена ствольно-подвесная конструктивная система.

Высотные здания с несущим стволом вошли в практику строительства прежде всего благодаря их удачной планировочной схеме и рациональному использованию уличного пространства у подножия здания. При этом здания ствольно-подвесного типа

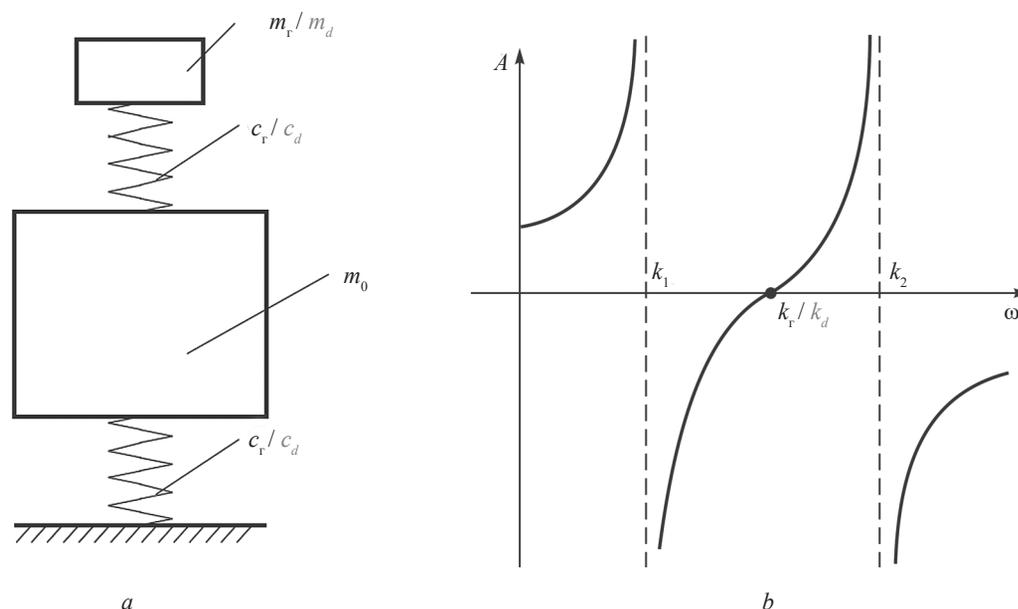
имеют другое важное достоинство, которое заключается в малой изгибной жесткости несущих элементов. Сооружения, спроектированные с учетом повышенной податливости конструкций, обладают лучшей сейсмостойкостью. Период собственных колебаний ствольно-подвесных зданий может превышать одну секунду, что позволяет снизить сейсмическую нагрузку на несущие элементы. Однако это свойство способно привести к негативным эффектам, которые выражаются в значительных смещениях подвешенных конструкций при сейсмических воздействиях низкочастотного характера [1, 2].

Один из подходов, обеспечивающих сопротивляемость сооружений землетрясениям, — устройство в них динамических гасителей колебаний. Эффект динамического гашения колебаний хорошо известен в динамике сооружений. Идея динамического гасителя состоит в том, что к колеблющемуся



Рис. 1. Возведенные здания: *a* — BP Building, г. Антверпен; *b* — Qube, г. Ванкувер; *c* — Tour Totem, г. Париж; *d* — Stalexport, г. Катовице

Fig. 1. Buildings erected: *a* — BP Building, Antwerp; *b* — Qube, Vancouver; *c* — Tour Totem, Paris; *d* — Stalexport, Katowice



**Рис. 2.** Динамический гаситель колебаний: *a* — принципиальная схема; *b* — амплитудно-частотная характеристика  
**Fig. 2.** Tuned mass damper: *a* — schematic diagram; *b* — amplitude-frequency response

объекту с помощью упругой связи присоединяют дополнительную массу (рис. 2, *a*).

Можно добиться полной остановки колеблющегося объекта. Для этого необходимо, чтобы парциальная частота колебаний гасителя равнялась частоте возмущающей силы:

$$k_r = \sqrt{c_r/m_r},$$

где  $c_r$  — жесткость гасителя;  $m_r$  — масса гасителя.

Этот эффект проиллюстрирован на рис. 2, *b*. На оси ординат отмечены частоты собственных колебаний системы  $k_1$  и  $k_2$ , а также парциальная частота колебаний гасителя.

В 1976 г. А.И. Цейтлинным было впервые предложено конструктивное решение, в котором в роли гасящей массы выступает гибкий верхний этаж, связанный с верхними конструкциями здания посредством гибкой связи [3]. Роль гибкой связи выполняют гибкие стойки. К стойкам подвешиваются легкие навесные стены. Здание с гибким верхним этажом впервые построено в г. Кировакане (Армения). Для гашения колебания опор мостов в качестве гасящей массы может служить пролетное строение. Эта идея первый раз реализована А.М. Уздиным [4] и получила развитие в работах его учеников [5–11].

Зачастую гасители колебаний представлены в виде массивных блоков, соединенных с конструкцией здания при помощи пружин или демпфирующих элементов. Масса подобных блоков, а также жесткость их связи с защищаемым сооружением должны обеспечивать достижение антирезонанса: эффекта, при котором инерционная сила движения дополнительной массы компенсирует возмущающее сейсмическое воздействие на систему. Рассеивания энергии колебаний можно достичь за счет приме-

нения гасителя колебаний в виде резервуаров с водой, установленных на верхних этажах здания [12]. Известен подход к устройству гасителя колебаний, предполагающий внедрение в защищаемую конструкцию маятниковой системы из массивного элемента и пружин [13, 14]. Одним из наиболее известных инерционных демпферов является маятниковый подвес в виде стального шара массой 660 т, установленный в небоскребе Тайбэй 101 в уровне верхних этажей (рис. 3).

Положительное влияние настраиваемых гасителей колебаний с большим массовым соотношением на сейсмостойкость зданий подтверждено в ряде исследований [15–17]. Динамические гасители колебаний позволяют снизить отклик высотных зданий и объектов на вихревое ветровое возмущение [18, 19].

Установление оптимальных характеристик системы инерционных демпферов — сложная инженерная задача, для решения которой в настоящее время применяются различные методы оптимизации [20]. Для этого оценивается влияние соотношения масс гасителя и защищаемой конструкции на сейсмостойкость зданий при землетрясениях с различным частотным составом [21].

Устройство динамических гасителей колебаний в зданиях требует внедрения в их конструкцию дополнительных массивных элементов, занимающих внутренний полезный объем. В зданиях ствольно-подвесного типа часть элементов подвешена к конструкциям несущего ствола. Данные элементы могут выполнять роль маятниковых гасителей колебаний несущего ствола в случае определения оптимальных массы подвеса и жесткости его связей с ядром здания. Это предположение проверяется в настоящей статье.

91-й этаж — 390,6 м. Открытая смотровая площадка  
 91st floor — 390.6 m. Outdoor observation deck

89-й этаж — 382,2 м. Крытая смотровая площадка  
 89st floor — 382.2 m. Indoor observation deck

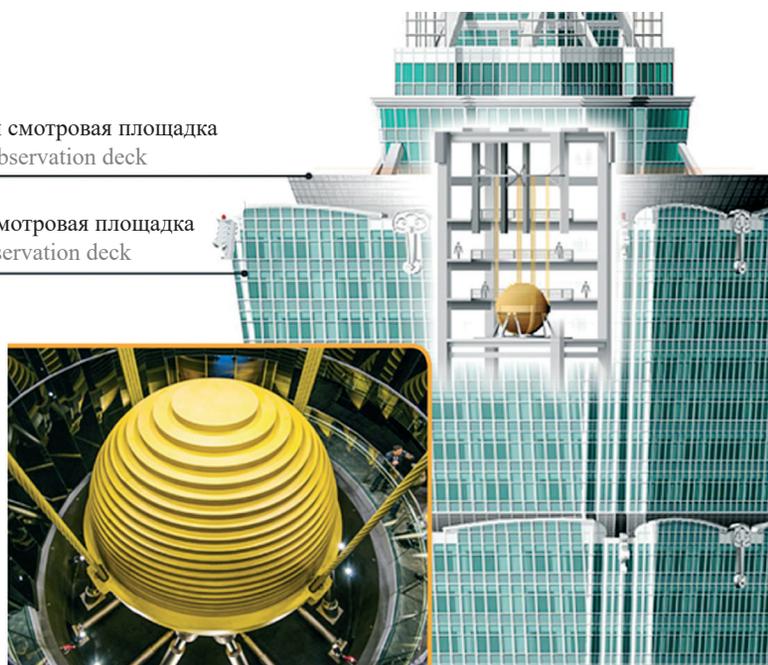


Рис. 3. Гаситель колебаний в здании Тайбэй 101

Fig. 3. Tuned mass damper in Taipei 101 building

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рис. 4 приведено конструктивное решение здания ствольно-подвесного типа, призванное обеспечить его сопротивляемость сейсмическим воздействиям путем динамического гашения колебаний. Ключевое отличие рассматриваемой конструкции здания от известных решений заключается в том, что подвешенные этажи объединены в геометрически неизменяемые блоки с независимой подвеской к несущему оголовку.

Расчетная схема здания изменяется при сейсмическом воздействии за счет разрушения выключающихся связей между блоками этажей и несущим стволом. Каждый этажный блок в дальнейшем может выступать в роли инерционного демпфера, так как обладает отличными от ядра жесткости частотами собственных колебаний. Данное конструктивное решение дает возможность настроить оптимальную массу блоков этажей путем изменения количества плит перекрытий, входящих в их состав, или изменения толщины этих перекрытий. Жесткость связи несущего ствола с подвешенными конструкциями определяется жесткостью упругих элементов, установленных в зазоре между ними.

В качестве объекта моделирования выбрано 17-этажное здание с тремя блоками этажей (рис. 5). Диаметр ядра равен 19 м, наружный диаметр здания — 38 м. Высота этажа составляет 3,3 м. Материал несущих конструкций ствола и ростверка здания — бетон марки В45. Конструкции перегородок и подвешенных плит перекрытий выполнены из бетона класса В30. В качестве несущих подвесок применены стальные канаты.

Стержневые железобетонные и стальные элементы состоят из универсальных конечных элементов (КЭ) пространственного стержня, элементы в виде пластин — из элементов тонкой оболочки. Всем под-

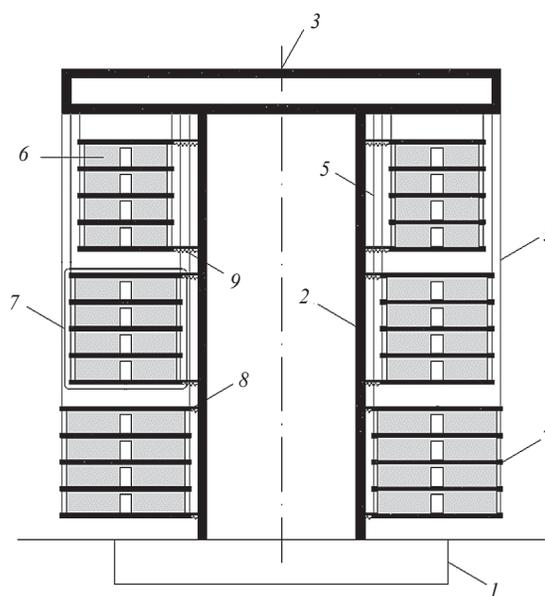


Рис. 4. Здание с подвешенными блоками этажей: 1 — фундамент; 2 — несущий ствол; 3 — консольный ростверк; 4 — плиты перекрытий; 5 — подвески; 6 — диафрагмы жесткости; 7 — геометрически неизменяемые блоки этажей; 8 — выключающиеся связи; 9 — упругие связи

Fig. 4. A building with suspended floor blocks: 1 — foundation; 2 — rigid core; 3 — cantilever; 4 — floor slabs; 5 — suspensions; 6 — stiffening diaphragms; 7 — stable floor blocks; 8 — switching connections; 9 — elastic connections

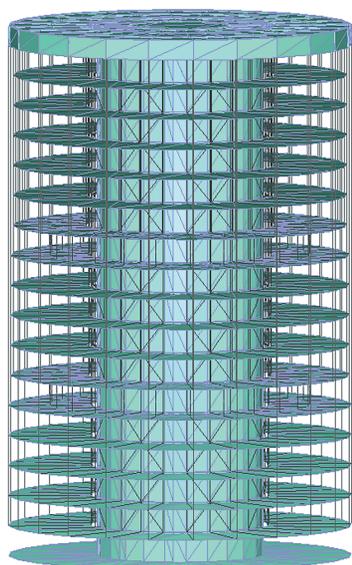


Рис. 5. Расчетная модель здания

Fig. 5. Calculation model of the building

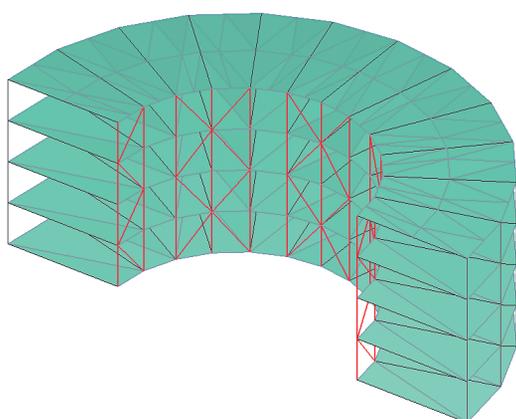


Рис. 6. Фрагмент расчетной модели с элементами пространственной жесткости

Fig. 6. A fragment of the calculation model with elements of spatial rigidity

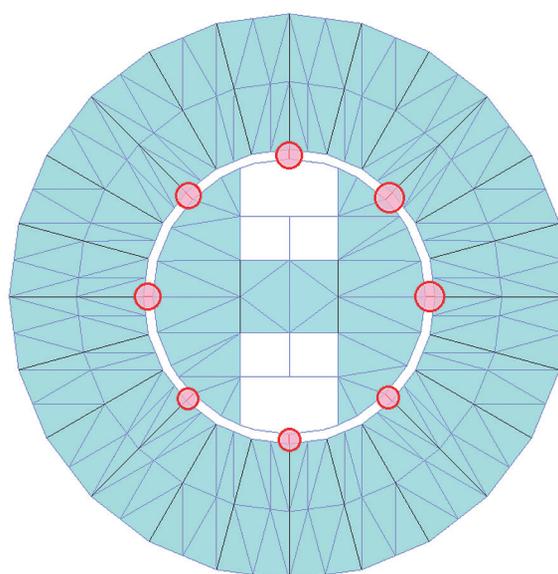


Рис. 7. Поперечное сечение расчетной модели с местами установки упругих элементов

Fig. 7. Cross-section of the calculation model with the locations of the elastic elements

вескам был задан тип геометрически нелинейного КЭ «нить».

Плиты перекрытий объединены в блоки при помощи пространственной решетчатой системы, изготовленной из элементов трубного проката (рис. 6). Места установки упругих связей в плане между несущим стволом и подвешенными перекрытиями представлены на рис. 7.

Для анализа влияния параметров подвешенных элементов на сейсмостойкость здания выбрана конструкция верхнего этажного блока, так как в уровне верхних этажей перемещения несущего ствола достигают наибольших значений. Масса блока этажей варьировалась в зависимости от толщины плит перекрытий, входящих в его состав (табл. 1).

Табл. 1. Масса верхнего подвешенного блока этажей

Table 1. The mass of the upper suspended floor block

Толщина перекрытий блока этажей, мм The thickness of the slabs of the floor block, mm	Масса надземной части здания, т The mass of the above-ground part of the building, t	Масса блока этажей, т The mass of the floor block, t	Относительная масса блока этажей, % Relative mass of a floor block, %
100	27 086	2408	8,9
200	28 286	3607	12,8
400	30 685	6006	19,6
600	33 084	8406	25,4
800	35 484	10 805	30,5
1000	37 883	13 204	34,9

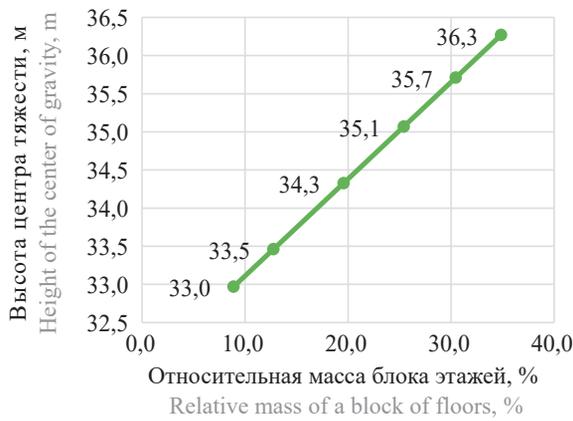


Рис. 8. Зависимость высоты центра тяжести здания от относительной массы верхнего подвешенного блока этажей

Fig. 8. Dependence of the height of the building's centre of gravity on the relative mass of the upper suspended floor block

Высота центра тяжести здания возрастает пропорционально увеличению относительной массы этажного блока (рис. 8).

Жесткость упругих связей принимала значения в диапазоне от 0 до 100 т/м.

К элементам расчетных моделей прикладывалась постоянная нагрузка, кратковременная нагрузка от людей и оборудования, а также особая нагрузка в виде нагрузки от землетрясения. Сейсмическое воздействие задавалось при помощи инструментальной трехкомпонентной сейсмограммы землетрясения, произошедшего в г. Цзици в 1999 г. (рис. 9). Для него характерно преобладание колебаний с периодом более одной секунды, отчего данное землетрясение можно условно отнести к низкочастотным. Колебания грунтового основания в подобном частотном диапазоне представляют наибольшую угрозу для целостности ствольных зданий подвешенного типа.

Численное моделирование зданий в условиях сейсмического воздействия выполнено в программ-

ном комплексе ЛИРА версии 10.12 во временной области в шаговой нелинейной постановке.

Эффективность применения рассматриваемого конструктивного решения здания ствольно-подвешенного типа оценивается на основе данных о перемещениях и ускорениях несущих конструкций при сейсмическом воздействии.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сведения о перемещениях и ускорениях конструкций, полученные в ходе численного моделирования рассматриваемых зданий, сравнивались с результатами расчетов здания с жесткой связью подвешенных блоков этажей с несущим стволом (рис. 10).

В качестве примера на рис. 11 приведена диаграмма максимальных перемещений элементов расчетной модели, в которой используются перекрытия толщиной 200 мм и отсутствуют упругие связи.

Было выявлено, что изменение продольной жесткости упругих связей практически не влияет на перемещения несущего ствола здания (табл. 2). При этом перемещения ядра здания могут быть снижены посредством изменения массы верхнего этажного блока: увеличение его относительной массы с 12,8 до 19,6 % привело к снижению перемещения несущего ствола на 3,1 % (рис. 12).

На значения перемещений подвешенных перекрытий влияют как их масса, так и жесткость их связей с несущим стволом (табл. 3). Перемещения подвешенного блока этажей, в состав которого входят перекрытия толщиной 400 мм, на 21,8 % ниже перемещений перекрытий, жестко связанных с несущим стволом (рис. 13).

Зданиям с большей относительной массой подвешенного блока этажей соответствуют меньшие значения ускорений конструкций ядра жесткости (табл. 4). Это может свидетельствовать о том, что при сейсмическом воздействии несущие элементы

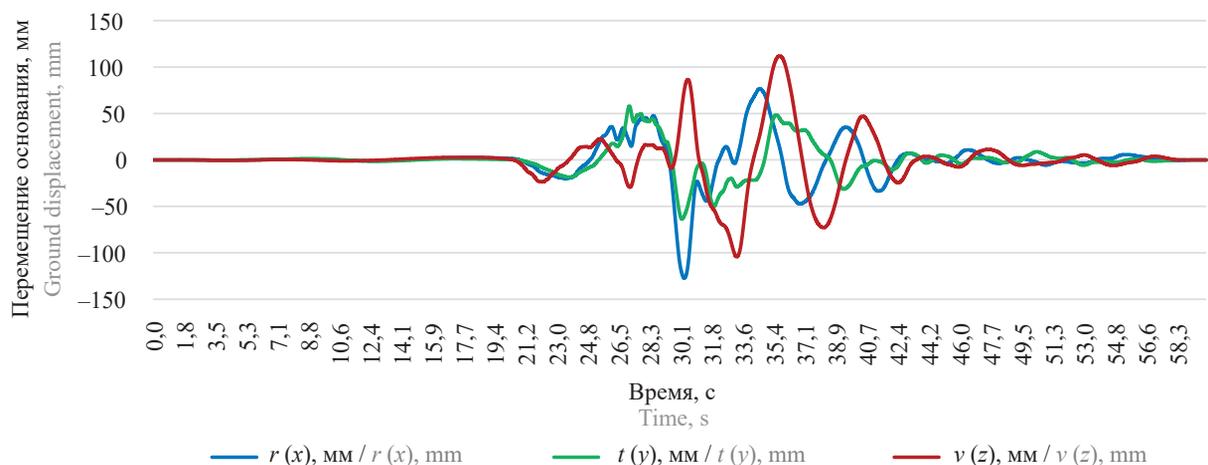


Рис. 9. Сейсмограмма землетрясения в г. Цзици, Тайвань

Fig. 9. Seismogram of earthquake in Jiji, Taiwan

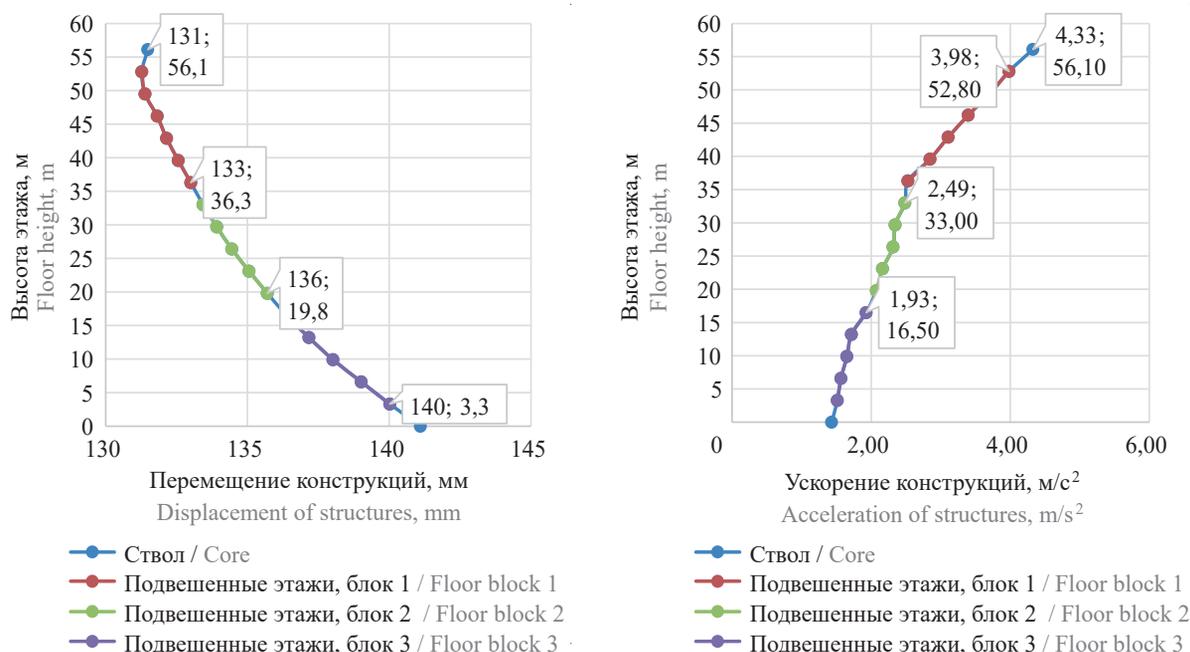


Рис. 10. Максимальные перемещения и ускорения конструкций расчетной модели с жесткой связью подвешенных блоков с несущим стволем при толщине перекрытий 200 мм

Fig. 10. Maximum displacements and accelerations of structures of the calculation model with a rigid connection between suspended blocks and core with a floor thickness of 200 mm

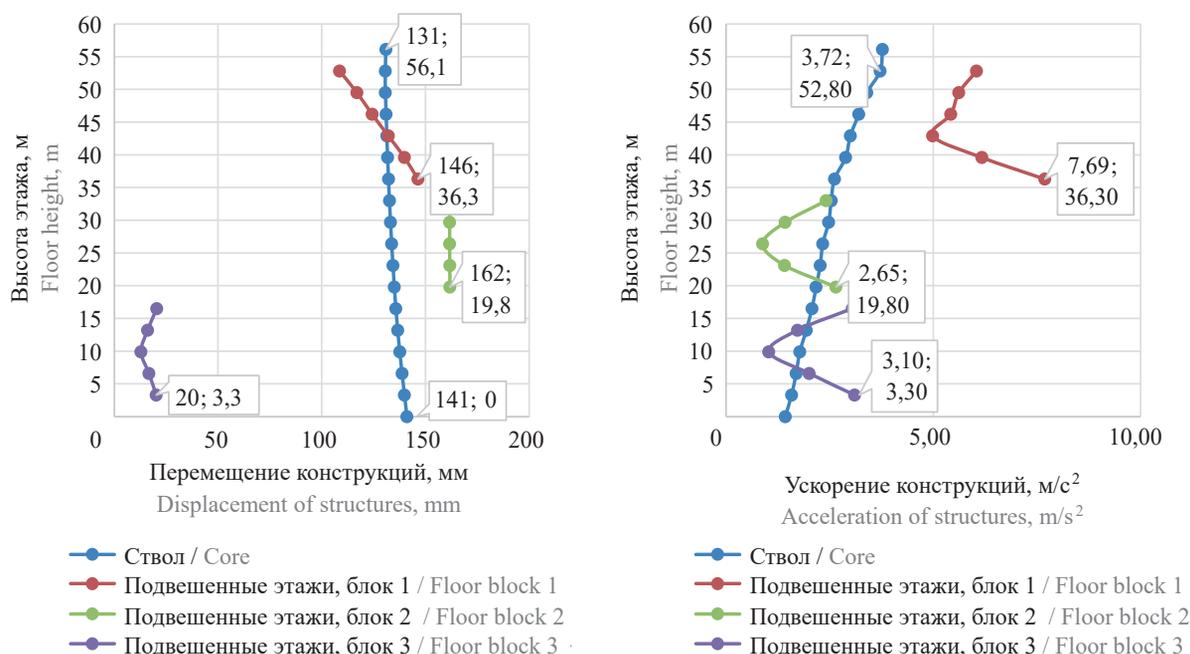


Рис. 11. Максимальные перемещения и ускорения конструкций расчетной модели без устройства упругих связей при толщине перекрытий 200 мм

Fig. 11. Maximum displacements and accelerations of the calculation model structures without elastic connections with a floor thickness of 200 mm

в них испытывают меньшую нагрузку. Во всех рассматриваемых случаях отсутствие жесткой связи подвешенных конструкций с несущим стволем приводит к уменьшению ускорений его конструкций вплоть до 20,1 % (рис. 14).

Увеличение относительной массы подвешенных конструкций также привело к уменьшению их ускорений при сейсмическом воздействии (табл. 5). Повышение жесткости упругих связей также привело к снижению максимальных ускорений подвешенных

Табл. 2. Максимальные горизонтальные перемещения конструкций несущего ствола в уровне верхнего этажа, мм  
 Table 2. The maximum horizontal displacement of the structures of the rigid core at the level of the upper floor, mm

		Относительная масса блока этажей $M$ , % Relative mass of a floor block $M$ , %					
		8,9	12,8	19,6	25,4	30,5	34,9
Жесткость связей, т/м Connection stiffness, t/m	0	131	131	127	136	135	129
	25	129	131	127	135	135	129
	50	129	131	127	135	135	129
	75	129	131	127	135	135	129
	100	129	132	128	135	135	130



Рис. 12. Перемещения стволос расчетных моделей при  $M = 12,8\%$  с жесткими связями и при  $M = 19,6\%$  с упругими связями  $R = 25$  тс/м

Fig. 12. Movements of the cores of the calculation models at  $M = 12.8\%$  with rigid connections and at  $M = 19.6\%$  with elastic connections  $R = 25$  t/m

Табл. 3. Максимальные горизонтальные перемещения конструкций подвешенного блока этажей, мм  
 Table 3. The maximum horizontal displacement of the structures of the suspended floor block, mm

		Относительная масса блока этажей $M$ , % Relative mass of a floor block $M$ , %					
		8,9	12,8	19,6	25,4	30,5	34,9
Жесткость связей, т/м Connection stiffness, t/m	0	146	146	104	148	134	181
	25	447	335	172	161	137	182
	50	284	449	402	302	329	205
	75	402	284	454	418	338	328
	100	405	315	406	456	413	367



Рис. 13. Перемещения перекрытий расчетных моделей при  $M = 12,8\%$  с жесткими связями и при  $M = 19,6\%$  с  $R = 0$  тс/м

Fig. 13. Movements of the slabs of the calculation models at  $M = 12.8\%$  with rigid connections and at  $M = 19.6\%$  with  $R = 0$  t/m

**Табл. 4.** Максимальные горизонтальные ускорения конструкций несущего ствола в уровне верхнего этажа,  $m/s^2$   
**Table 4.** The maximum horizontal accelerations of the structures of the rigid core at the level of the upper floor,  $m/s^2$

		Относительная масса блока этажей $M$ , % Relative mass of a floor block $M$ , %					
		8,9	12,8	19,6	25,4	30,5	34,9
Жесткость связей, т/м Connection stiffness, t/m	0	3,78	3,78	3,68	3,58	3,56	3,57
	25	3,75	3,71	3,67	3,64	3,66	3,56
	50	3,72	3,79	3,66	3,58	3,52	3,55
	75	3,72	3,69	3,66	3,61	3,47	3,53
	100	3,72	3,71	3,65	3,64	3,46	3,52

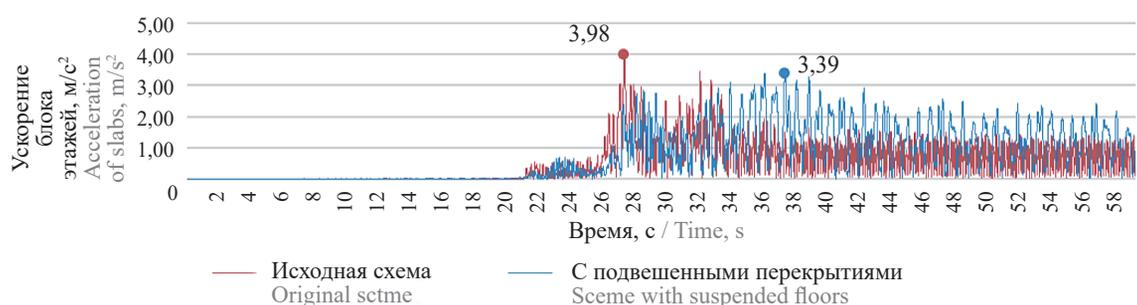


**Рис. 14.** Ускорения стволов расчетных моделей при  $M = 12,8\%$  с жесткими связями и при  $M = 30,5\%$  с упругими связями  $R = 100$  тс/м

**Fig. 14.** Accelerations of the cores of the calculation models at  $M = 12.8\%$  with rigid connections and at  $M = 30.5\%$  with elastic connections  $R = 100$  t/m

**Табл. 5.** Максимальные горизонтальные ускорения конструкций подвешенного блока этажей,  $m/s^2$   
**Table 5.** The maximum horizontal accelerations of the structures of the suspended floor block,  $m/s^2$

		Относительная масса блока этажей $M$ , % Relative mass of a floor block $M$ , %					
		8,9	12,8	19,6	25,4	30,5	34,9
Жесткость связей, т/м Connection stiffness, t/m	0	7,69	7,69	4,23	4,38	3,43	3,6
	25	10,35	8,17	4,14	4,37	3,43	3,54
	50	11,31	8,52	4,05	4,25	3,44	3,48
	75	11,58	8,57	4,03	4,2	3,47	3,4
	100	10,89	8,86	4,02	4,33	3,5	3,4



**Рис. 15.** Ускорения перекрытий расчетных моделей при  $M = 12,8\%$  с жесткими связями и при  $M = 34,9\%$  с упругими связями  $R = 100$  тс/м

**Fig. 15.** Accelerations of the slabs of the calculation models at  $M = 12.8\%$  with rigid connections and at  $M = 34.9\%$  with elastic connections  $R = 100$  t/m

элементов. Ускорения конструкций блока этажей с относительной массой 34,9 % при жесткости упругих связей 100 т/м на 55,8 % ниже ускорений перекрытий, жестко связанных с несущим стволом (рис. 15).

Стоит отметить, что при упругой связи перекрытий со стволом в здании колебания несущих элементов затухают медленнее, чем при жесткой связи конструкций (рис. 13–15). В условиях продолжительного сейсмического воздействия применение подвешенных конструкций может привести к негативным последствиям, выраженным в нарушении целостности несущих элементов. В этой связи целесообразно использовать в зданиях ствольно-подвесного типа демпфирующие устройства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве гасящей массы целесообразно использовать части самой защищаемой конструкции. Эта идея может быть реализована в зданиях ствольно-подвесной системы. Конструкцию верхних подвешенных этажей можно условно принимать как элемент конструкции гасителя колебаний, а подвески рассматривать в качестве гибкой связи непосредственно

со зданием. При этом обеспечить условия эффективной настройки такого гасителя с учетом вышеизложенных рекомендаций к классическому варианту динамического гасителя достаточно сложно, учитывая непредсказуемый и сложный характер землетрясения. Однако роль верхних подвешенных этажей в общей системе повышения сейсмостойкости здания рассматриваемого типа может быть существенной.

Перемещения конструкций здания, в котором относительная масса подвешенного блока этажей достигала 19,6 %, принимали наименьшие значения.

Зданиям с большей массой подвешенных конструкций соответствовали меньшие значения ускорений несущих элементов.

Изменение массы подвешенных элементов и жесткости связей между конструкциями ствольно-подвесного здания может привести к гашению колебаний системы.

Дальнейшие исследования могут быть посвящены аналитическому определению оптимальных инженерных параметров подвешенных конструкций, обеспечивающих восприятие и рассеивание колебательной энергии сейсмического воздействия.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Belash T., Svitlik I.* Damping of Structures of Earthquake-Resistant Suspended Buildings // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Pp. 289–297. DOI: 10.1007/978-3-031-21120-1\_28

2. *Белаш Т.А., Свитлик И.В.* К вопросу о повышении сейсмостойкости зданий подвесного типа в районах высокой сейсмической активности // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2023. № 2. С. 54–66. DOI: 10.37153/2618-9283-2023-1-54-66. EDN XPGUVQ.

3. *Цейтлин А.И., Ким Л.И.* Сейсмические колебания многоэтажного здания с «гибким» верхним этажом // Снижение материалоемкости и трудоемкости сейсмостойкого строительства : тез. докл. Всесоюзного совещания. 1982. 85 с.

4. *Белаш Т.А., Беляев В.С., Уздин А.М., Ермошин А.А., Кузнецова И.О.* Сейсмоизоляция. Современное состояние // Избранные статьи профессора О.А. Савинова и ключевые доклады, представленные на четвертые Савиновские чтения. 2004. С. 95–128.

5. *Уздин А.М., Нестерова О.П., Федорова М.Ю., Гуан Ю.Х.* Особенности расчетного обоснования параметров динамических гасителей колебаний для сейсмозащиты зданий и сооружений // XIV Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию : мат. науч.-практ. конф. 2021. С. 135–136. DOI: 10.37153/2687-0045-2021-14-135-136. EDN HGYZHA.

6. *Нестерова О.П., Уздин А.М., Федорова М.Ю.* Особенности применения динамических га-

сителей колебаний для сейсмозащиты зданий и сооружений // IX Поляховские чтения : мат. Междунар. науч. конф. по механике. 2021. С. 119–121. EDN OUDZYG.

7. *Нестерова О.П., Уздин А.М., Фрезе М.В.* Учет демпфирования при подборе параметров динамических гасителей сейсмических колебаний // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2022. № 5 (60). С. 35–42. DOI: 10.55341/ptrbs.2022.60.5.002. EDN CUDKGF.

8. *Нестерова О.П., Уздин А.М.* Особенности подбора динамических гасителей колебаний (ДГК) сейсмических колебаний при сильных землетрясениях // Архитектура – строительство – транспорт : мат. 74-й науч. конф. профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета, в 2 частях. 2018. С. 43–48. EDN WYUHZB.

9. *Нестерова О.П., Уздин А.М., Ухова Н.Ю., Фролова Е.Д., Фрезе М.В., Гуань Ю.* Об одном способе повышения сейсмостойкости портовых причалов // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2022. № 3 (58). С. 26–28. DOI: 10.55341/ptrbs.2022.58.3.003. EDN USNBSY.

10. *Сафронова В.Ю., Пронина А.А., Уздин А.М.* Эффективность надстройки гибкого верхнего этажа для повышения сейсмостойкости зданий на нескальных основаниях // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2022. Т. 1. С. 483–487. EDN ANOOZD.

11. Желиостов Д.А., Медведева А.А., Уздин А.М., Ухова Н.Ю., Нестерова О.П. Некоторые особенности подбора параметров двухмассовых динамических гасителей сейсмических колебаний // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2023. № 1 (62). С. 27–31. DOI: 10.55341/ptrbs.2023.62.1.006. EDN LUEGHZ.

12. Vaghela V., Patel V., Bhatt P. Behavior of Structures Under Dynamic Loading Having Water Tank Designed as Tuned Mass Damper // International Journal of Civil Engineering. 2022. Vol. 9. Issue 6. Pp. 62–71. DOI: 10.14445/23488352/ijce-v9i6p106

13. Maddah Sadatieh M.S., Ghorbani-Tanha A.K. An innovative semi-active pendulum tuned mass damper and its application in vibration control // Journal of Vibration and Control. 2023. Vol. 29. Issue 7–8. Pp. 1820–1832. DOI: 10.1177/10775463211070903

14. Xiang Y., Tan P., He H., Shang J., Zhang Y. Seismic optimization of variable friction pendulum tuned mass damper with hysteretic damping characteristic // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2022. Vol. 160. P. 107381. DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107381

15. Kang Y., Peng L., Pan P., Wang H., Xiao G. Seismic performances of a structure equipped with a large mass ratio multiple tuned mass damper // The Structural Design of Tall and Special Buildings. 2020. Vol. 29. Issue 17. DOI: 10.1002/tal.1803

16. Prakash Sh., Jangid R.S. Optimum parameters of tuned mass damper-inerter for damped structure un-

der seismic excitation // International Journal of Dynamics and Control. 2022. Vol. 10. Issue 5. Pp. 1322–1336. DOI: 10.1007/s40435-022-00911-x

17. Fahimi Farzam M., Hojat Jalali H. Tandem tuned mass damper inerter for passive control of buildings under seismic loads // Structural Control and Health Monitoring. 2022. Vol. 29. Issue 9. DOI: 10.1002/stc.2987

18. Rahman S., Jain A.K., Jha K.N., Bharti S.D., Datta T.K. Response control of chimneys using tuned mass damper, multi-tuned mass damper and tuned mass inerter system // Structures. 2024. Vol. 69. P. 107526. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107526

19. Dirbas W., Diken H., Alnefaie K. The Effect of Tuned Mass Damper Mass Ratio on Wind Turbine Vibration Mitigation // Engineering, Technology & Applied Science Research. 2024. Vol. 14. Issue 6. Pp. 18388–18394. DOI: 10.48084/etasr.9170

20. Akbari-Helm M., Massoudi M.S. A comparison of deterministic and reliability-based optimization of tuned mass damper under uncertainties // Asian Journal of Civil Engineering. 2022. Vol. 23. Issue 2. Pp. 203–217. DOI: 10.1007/s42107-022-00418-y

21. Araz O. Optimization of tuned mass damper inerter for a high-rise building considering soil-structure interaction // Archive of Applied Mechanics. 2022. Vol. 92. Issue 10. Pp. 2951–2971. DOI: 10.1007/s00419-022-02217-y

Поступила в редакцию 20 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 10 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 26 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Илья Владимирович Свитлик** — аспирант кафедры металлических и деревянных конструкций; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; Scopus: 57486237400, ResearcherID: GQA-5384-2022, ORCID: 0000-0003-2878-4938; svitlik.i@yandex.ru;

**Татьяна Александровна Белааш** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных сооружений, конструкций и материалов; **Научно-исследовательский центр «Строительство» (НИЦ «Строительство»)**; 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д. 6; SPIN-код: 5217-7177, РИНЦ ID: 66498, Scopus: 7801647643, ResearcherID: B-7819-2018, ORCID: 0000-0002-4577-8794; belashta@mail.ru.

Вклад авторов:

Свитлик И.В. — сбор и обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Белааш Т.А. — идея и концепция исследования, научное руководство, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Belash T., Svitlik I. Damping of Structures of Earthquake-Resistant Suspended Buildings. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023; 289-297. DOI: 10.1007/978-3-031-21120-1\_28

2. Belash T.A., Svitlik I.V. On the issue of improving the seismic resistance of suspended buildings in ar-

reas of high seismic activity. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2023; 2:54-66. DOI: 10.37153/2618-9283-2023-1-54-66. EDN XPGUVQ. (rus.)

3. Zeitlin A.I., Kim L.I. Seismic vibrations of a multi-storey building with a “flexible” upper floor. *Reducing the material consumption and labor inten-*

sity of earthquake-resistant construction : abstracts of the All-Union Meeting. 1982; 85. (rus.).

4. Belash T.A., Belyaev V.S., Uzdin A.M., Ermoshin A.A., Kuznetsova I.O. Seismic isolation. Current status. *Selected articles by Professor O.A. Savinov and key reports presented at the fourth Savinov Readings*. 2004; 95-128. (rus.).

5. Uzdin A.M., Nesterova O.P., Fedorova M.Yu., Guan Yu.Kh. Features of the calculation substantiation of the parameters of dynamic vibration dampers for seismic protection of buildings and structures. *XIV Russian National Conference on Earthquake Engineering and Seismic Zoning: materials of the scientific and practical conference*. 2021; 135-136. DOI: 10.37153/2687-0045-2021-14-135-136. EDN HGYZHA. (rus.).

6. Nesterova O.P., Uzdin A.M., Fedorova M.Yu. Features of the use of dynamic vibration dampers for seismic protection of buildings and structures. *IX Polyakhov readings: proceedings of the international scientific conference on mechanics*. 2021; 119-121. EDN OUDZYG. (rus.).

7. Nesterova O.P., Uzdin A.M., Frese M.V. Accounting for damping in the selecting parameters of mass dampers. *Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures*. 2022; 5(60):35-42. DOI: 10.55341/ptrbs.2022.60.5.002. EDN CUDKGF. (rus.).

8. Nesterova O.P., Uzdin A.M. Specifics of selecting dynamic absorbers (DAS) of seismic vibrations in case of severe earthquakes. *Architecture-construction-transport : materials of the 74th scientific conference of the University's faculty and graduate students, in 2 parts*. 2018; 43-48. EDN WYYHQB. (rus.).

9. Nesterova O.P., Uzdin A.M., Ukhova N.Yu., Frolova E.D., Frese M.V., Guan Yu. About one way to increase seismic resistance of port berths. *Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures*. 2022; 3(58):26-28. DOI: 10.55341/ptrbs.2022.58.3.003. EDN USNBSY. (rus.).

10. Safronova V.Y., Pronina A.A., Uzdin A.M. Efficiency of superstructure of flexible upper floor to increase seismic resistance of buildings on non-rock bases. *Scientifically technical and economical cooperation in Asia-pacific countries in the 21st century*. 2022; 1:483-487. EDN ANOOZD. (rus.).

11. Zheliostov D.A., Medvedeva A.A., Uzdin A.M., Ukhova N.Yu., Nesterova O.P. Some features of the selection of parameters of two-mass dynamic dampers of seismic vibrations. *Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures*. 2023; 1(62):27-31. DOI: 10.55341/ptrbs.2023.62.1.006. EDN LUEGHZ. (rus.).

12. Vaghela V., Patel V., Bhatt P. Behavior of Structures Under Dynamic Loading Having Water Tank Designed as Tuned Mass Damper. *International Journal of Civil Engineering*. 2022; 9(6):62-71. DOI: 10.14445/23488352/ijce-v9i6p106

13. Maddah Sadatieh M.S., Ghorbani-Tanha A.K. An innovative semi-active pendulum tuned mass damper and its application in vibration control. *Journal of Vibration and Control*. 2023; 29(7-8):1820-1832. DOI: 10.1177/10775463211070903

14. Xiang Y., Tan P., He H., Shang J., Zhang Y. Seismic optimization of variable friction pendulum tuned mass damper with hysteretic damping characteristic. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2022; 160:107381. DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107381

15. Kang Y., Peng L., Pan P., Wang H., Xiao G. Seismic performances of a structure equipped with a large mass ratio multiple tuned mass damper. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2020; 29(17). DOI: 10.1002/tal.1803

16. Prakash Sh., Jangid R.S. Optimum parameters of tuned mass damper-inerter for damped structure under seismic excitation. *International Journal of Dynamics and Control*. 2022; 10(5):1322-1336. DOI: 10.1007/s40435-022-00911-x

17. Fahimi Farzam M., Hojat Jalali H. Tandem tuned mass damper inerter for passive control of buildings under seismic loads. *Structural Control and Health Monitoring*. 2022; 29(9). DOI: 10.1002/stc.2987

18. Rahman S., Jain A.K., Jha K.N., Bharti S.D., Datta T.K. Response control of chimneys using tuned mass damper, multi-tuned mass damper and tuned mass inerter system. *Structures*. 2024; 69:107526. DOI: 10.1016/j.is-truc.2024.107526

19. Dirbas W., Diken H., Alnefaie K. The Effect of Tuned Mass Damper Mass Ratio on Wind Turbine Vibration Mitigation. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2024; 14(6):18388-18394. DOI: 10.48084/etasr.9170

20. Akbari-Helm M., Massoudi M.S. A comparison of deterministic and reliability-based optimization of tuned mass damper under uncertainties. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2022; 23(2):203-217. DOI: 10.1007/s42107-022-00418-y

21. Araz O. Optimization of tuned mass damper inerter for a high-rise building considering soil-structure interaction. *Archive of Applied Mechanics*. 2022; 92(10):2951-2971. DOI: 10.1007/s00419-022-02217-y

Received February 20, 2025.

Adopted in revised form on April 10, 2025.

Approved for publication on May 26, 2025.

**BIONOTES:** Ilya V. Svitlik — postgraduate student of the Department of Metal and Timber Constructions; Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU); 4, 2nd Krasnoarmeiskaya st.,

Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; Scopus: 57486237400, ResearcherID: GQA-5384-2022, ORCID: 0000-0003-2878-4938; svitlik.i@yandex.ru;

**Tatiana A. Belash** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Structures, Constructions and Materials; **Research Center “Construction”**; 6, 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation; SPIN-code: 5217-7177, ID RSCI: 66498, Scopus: 7801647643, ResearcherID: B-7819-2018, ORCID: 0000-0002-4577-8794; belashta@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Ilya V. Svitlik — collection and processing of the material, writing of the source text, final conclusions.*

*Tatiana A. Belash — the idea and concept of research, scientific guidance, final conclusions.*

*The authors declare no conflict of interest.*

## Оценка несущей способности опорных конструкций арктической ветроэнергетической установки на основе аэросервоупругого моделирования

Иван Владимирович Ригель, Виктор Васильевич Елистратов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);

г. Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Ветроэнергетика играет ключевую роль в развитии возобновляемых источников энергии, особенно в удаленных районах Арктики с автономными энергосистемами. Обеспечение надежности и долговечности опорных конструкций ветроэнергетических установок (ВЭУ) в арктической зоне Российской Федерации является важной научно-технической задачей. Уникальные климатические условия, включающие низкую температуру, сильные ветровые нагрузки, снег и обледенение, значительно усложняют проектирование таких объектов. Цель исследования — разработка комплексной методики аэросервоупругого моделирования ВЭУ для оценки несущей способности опорных конструкций и оптимизации несущей конструктивной системы ВЭУ.

**Материалы и методы.** На примере ВЭУ мощностью 100 кВт высотой 30 м используется импульсно-лопастный анализ и аэросервоупругое моделирование в программном комплексе (ПК) QBlade, для расчета напряженно-деформированного состояния несущей конструктивной системы применяется конечно-элементный ПК FEA NX. Рассмотрены расчетные режимы работы ВЭУ с различными условиями ветра и обледенения. Моделирование охватывает как рабочие, так и экстремальные режимы эксплуатации, включая анализ динамических нагрузок и влияние резонансных эффектов.

**Результаты.** Разработана методика аэросервоупругого моделирования, позволяющая учитывать сложные эксплуатационные и климатические воздействия на элементы ВЭУ. Определены нагрузки на элементы ВЭУ, в том числе в различных режимах работы и при обледенении ветроколеса, выявлены их экстремальные сочетания. Выполнен анализ прочности и устойчивости опорных конструкций. Предложены конструктивные мероприятия для повышения несущей способности конструктивной системы. Сформулированы рекомендации по дальнейшей оптимизации конструкции ВЭУ для эксплуатации в арктических условиях.

**Выводы.** Методика позволяет учитывать климатические факторы Арктики для оценки несущей способности опорных конструкций ВЭУ. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании арктических ВЭУ класса S, а также при разработке методических рекомендаций по расчету ветроэнергетических установок, для повышения надежности и эффективности конструкций ВЭУ, используемых в арктической зоне РФ.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ветроэнергетическая установка (ВЭУ), опорные конструкции, конструктивная система, башня, аэросервоупругое моделирование, арктическая зона, обледенение, напряженно-деформированное состояние (НДС)

*Благодарности.* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00497 (URL: <https://rscf.ru/project/25-29-00497/>). Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам и редакции журнала.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Ригель И.В., Елистратов В.В. Оценка несущей способности опорных конструкций арктической ветроэнергетической установки на основе аэросервоупругого моделирования // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 1030–1050. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1030-1050

Автор, ответственный за переписку: Иван Владимирович Ригель, [ivan.rigel@yandex.ru](mailto:ivan.rigel@yandex.ru).

## Support structure strength assessment based on aeroservoelastic modelling of an Arctic wind turbine

Ivan V. Rigel, Viktor V. Elistratov

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

### ABSTRACT

**Introduction.** Wind energy plays a key role in the development of renewable energy sources, especially in remote areas of the Arctic with autonomous power systems. Ensuring the reliability and durability of wind turbine supporting structures in the Arctic zone of the Russian Federation is an important scientific and technical task. Unique climatic conditions including low temperature, strong wind loads, snow and icing considerably complicate the design of such facilities. The purpose of the study is to develop a comprehensive methodology of aeroservoelastic modelling of wind turbines to assess the load-bearing capacity of supporting structures and to optimize the load-bearing structural system of wind turbines.

**Materials and methods.** A 100 kW wind turbine with a height of 30 is considered as an example. Blade element momentum analysis and aeroservoelastic modelling in the QBlade software are used, and the finite-element software FEA NX is used to calculate the stress-strain state of the supporting structural system. The design wind turbine operation modes with different wind and icing conditions are considered. Modelling covers normal and extreme modes, including analysis of dynamic loads and the influence of resonance effects.

**Results.** A methodology of aeroservoelastic modelling has been developed, which makes it possible to consider complex operational and climatic effects on the elements of wind turbines. The loads on the wind turbine elements in different operating modes and with rotor icing are determined, their extreme combinations are revealed. Strength and stability analysis of support structures is performed. Structural measures are proposed to increase structural system load-bearing capacity. Recommendations on further optimization of wind turbine design for operation in the Arctic conditions are prepared.

**Conclusions.** The methodology allows considering the climatic factors of the Arctic to assess the load-bearing capacity of wind turbine support structures. The results obtained can be used in the design of S-class Arctic wind turbines, as well as in the development of methodological recommendations for the calculation of wind turbines, to improve the reliability and efficiency of wind turbine designs used in the Arctic zone of the Russian Federation.

**KEYWORDS:** wind turbine, support structures, structural system, tower, aeroservoelastic modelling, Arctic zone, icing, stress-strain state

*Acknowledgements.* The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-29-00497 (URL: <https://rscf.ru/project/25-29-00497/>). The authors would like to thank the anonymous reviewers and the editorial board of the journal.

**FOR CITATION:** Rigel I.V., Elistratov V.V. Support structure strength assessment based on aeroservoelastic modelling of an Arctic wind turbine. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):1030-1050. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1030-1050 (rus.).

*Corresponding author:* Ivan V. Rigel, [ivan.rigel@yandex.ru](mailto:ivan.rigel@yandex.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит значительное переосмысление стратегических принципов развития энергетики. Сложилось устойчивое понимание, что экономическое развитие общества должно быть экологически безопасным и энергетически независимым. Ветроэнергетика вместе с солнечной генерацией находятся в авангарде этих преобразований: согласно данным Международного энергетического агентства (IEA), ожидается, что их совокупная доля вырастет до 18 % в 2025 г. по сравнению со всего 4 % десятилетием ранее. Прогнозируется, что годовой прирост генерации на основе возобновляемых источников энергии в 2025 г. более чем в два раза превысит среднегодовой рост производства в 2019–2023 гг., а общий объем производства энергии превзойдет мощности угольной генерации в мировом энергетическом балансе и будет эквивалентен общему спросу на электроэнергию Франции и Италии вместе взятых<sup>1</sup>. Одной из наиболее перспективных областей для использования энергии ветра являются изолированные энергосистемы северных регионов [1]. Ключевое сооружение объектов генерации на основе энергии ветра — ветроэнергетические установки (ВЭУ), работающие в составе ветроэлектростанций (ВЭС) и ветродизельных энергокомплексов (ВДЭК).

Эксплуатация ВЭУ в арктической зоне связана с климатическими факторами, которые предъявляют повышенные требования к надежности их конструкций. Главные климатические воздействия включают низкие температуры, сильные ветровые нагрузки, обледенение, снеговые нагрузки, сезонное оттаивание основания и деградацию многолетней

мерзлоты. Эти факторы существенно усложняют эксплуатацию, снижают выработку электроэнергии и сокращают срок службы сооружения, если конструктивные решения и материалы не адаптированы к экстремальным условиям.

Низкие температуры (до  $-50$  °C и ниже) приводят к снижению пластичности и ударной вязкости конструкционных материалов, что повышает риск хрупких разрушений. Обледенение не только увеличивает нагрузку на элементы ВЭУ, но и снижает эффективность генерации энергии за счет изменения аэродинамических характеристик лопастей. Турбулентность ветра в Арктике может иметь более выраженный и нерегулярный характер из-за особенностей ландшафта и температурных градиентов, что вызывает необходимость учета повышенных динамических нагрузок. Снеговые и гололедные нагрузки могут увеличивать статическое и динамическое воздействие на опорные конструкции в процессе эксплуатации ВЭУ, а также нарушать баланс ротора и гондолы, создавая дополнительные усилия в механических узлах. Изменяющиеся геокриологические условия, такие как промерзание и оттаивание сезонно-талого слоя, а также деградация многолетнемерзлого грунта (ММГ) приводят к изменению жесткости закрепления опорных конструкций и дополнительному риску возникновения резонанса, чрезмерных динамических нагрузок [2] и потери устойчивости несущей конструктивной системы.

Специфика эксплуатации ВЭУ требует комплексного подхода к проектированию, включающего этап аэросервоупругого моделирования. Данный подход предполагает совместное моделирование аэродинамических воздействий (аэро-), алгоритмов

<sup>1</sup> Electricity Mid-Year Update. International Energy Agency. 2024. URL: [https://iea.blob.core.windows.net/assets/234d0d22-6f5b-4dc4-9f08-2485f0c5ec24/ElectricityMid-YearUpdate\\_July2024.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/234d0d22-6f5b-4dc4-9f08-2485f0c5ec24/ElectricityMid-YearUpdate_July2024.pdf)

системы автоматизированного управления (серво-) и напряженно-деформированных состояний (НДС) конструктивных элементов (упругость). Несмотря на значительный прогресс в области проектирования ВЭУ, учет особенностей арктических условий при использовании аэросервоупругого моделирования для оценки их надежности и долговечности остается недостаточно разработанной темой, большинство имеющихся исследований сосредоточено на нормальных эксплуатационных условиях, которые не учитывают специфику низких температур, обледенения, снеговых нагрузок, характерных для Арктики.

Помимо ВЭУ стандартных классов (IA–IIIС), существуют ВЭУ особого класса (S) арктического исполнения, однако условия арктической зоны РФ не позволяют использовать их без дополнительного обоснования и адаптации [3]. Это приводит к необходимости адаптации и развития современных методов анализа для проектирования ВЭУ, предназначенных для эксплуатации в российской Арктике, в целях разработки уникальных арктических ВЭУ класса S, устойчивых к более суровым условиям, а также обоснования возможности применения существующих решений на конкретной площадке строительства.

Большое внимание в исследованиях арктических ВЭУ уделяется проблеме обледенения конструктивных элементов. Отдельные исследования рассматривают влияние обледенения на лопасти ВЭУ [4–6], но они редко интегрируют аэродинамические, управляющие воздействия и деформирование элементов в единый подход, а также сосредоточены на анализе изменения энергетических параметров ветроагрегата и в них не уделяется внимание дополнительным нагрузкам на несущие конструкции ВЭУ. Подобный комплексный подход использован в работе [7], где на примере небольшой двухлопастной экспериментальной ВЭУ разработкой NREL моделируется обледенение и его влияние на нагрузки и усилия в башне и лопастях. Вопросы влияния повышенной плотности воздуха, снегонакопления на гондоле остаются вне поля зрения большинства научных работ. Отсутствие комплексных исследований, учитывающих вышеперечисленные факторы, затрудняет разработку адаптированных конструктивных решений и снижает точность оценки несущей способности конструкций ВЭУ в арктических условиях. Решение этой проблемы потенциально повысит надежность и экономическую эффективность ВЭУ, применяемых в экстремальных условиях арктической зоны РФ.

Универсальный подход для решения указанной проблемы — использование методов аэросервоупругого моделирования, позволяющего учитывать природно-климатические характеристики арктического региона для исследования НДС несущей конструктивной системы ВЭУ.

Примеров применения аэросервоупругого моделирования ВЭУ в отечественной научной литературе не найдено, имеются исследования с использованием методов вычислительной гидрогазодинамики (computational fluid dynamics — CFD) для моделирования лопастей, ВЭУ, ветроколес [1, 8–10], а также методов механики деформируемого тела для расчета конструктивных элементов [1, 11, 12]. В данных работах отсутствует комплексный подход по учету динамических нагрузок от ветроколеса, работающего в турбулентном ветровом потоке. Известны публикации [13, 14], использующие методы совместного моделирования аэродинамики и аэроупругости (CFD + fluid structure interaction — FSI), однако эти подходы требуют значительных вычислительных ресурсов и времени, что затрудняет их применение в условиях комплексного многосценарного анализа ВЭУ.

В зарубежной практике, как правило, в основе аэросервоупругого моделирования ВЭУ лежит импульсно-лопастный метод (BEM) [15, 16], который реализован в специализированных программных комплексах (ПК), таких как QBlade, OpenFAST [17–20]. Этот метод дает возможность моделировать различные эксплуатационные режимы, определять энергетические характеристики, анализировать выработку энергии во временной области и НДС элементов конструкции. Основой данного подхода служит создание цифрового прототипа ВЭУ, включающего математическое описание аэродинамических, деформационных и массогабаритных параметров элементов, который подвергается виртуальным испытаниям.

Использование аэросервоупругого моделирования регламентировано международным стандартом IEC 61400, в котором указывается необходимость динамического моделирования с учетом всех указанных выше параметров, однако в нем отсутствуют методы учета специфических факторов северных регионов, таких как снеговые нагрузки, изменения плотности и влажности воздуха при низких температурах. В последней редакции IEC 61400 добавлены приложения, регламентирующие методы определения дополнительной массы и ухудшения аэродинамических характеристик лопастей из-за обледенения. В этой области активно ведутся исследования, включая моделирование процессов обледенения с помощью методов CFD и их влияние на работу ВЭУ, а также поиск путей интеграции эффектов, связанных с обледенением, в аэросервоупругое моделирование [4–7].

С целью расчетов НДС конструктивных элементов ВЭУ с учетом результатов аэросервоупругого моделирования могут быть применены специализированные ПК для моделирования механики деформируемого твердого тела, такие как ANSYS Mechanical, Abaqus, SAP2000 и др. [1, 2, 11, 12, 21–23].

Несмотря на активное развитие методов аэросервоупругого моделирования в мировой практике проектирования ВЭУ, существующие подходы не адаптированы к экстремальным климатическим условиям Арктики. Отсутствуют исследования, которые бы объединяли эксплуатационные и особые климатические факторы арктической зоны в рамках единой методики, позволяющей повысить точность расчетов конструкций ВЭУ.

Цель исследования — разработка системного подхода, который объединял бы аэросервоупругое моделирование и расчет несущих конструкций ВЭУ в комплексную взаимосвязанную методику. Данная методика позволит учесть турбулентность ветра, снеговые, гололедные, температурные, эксплуатационные воздействия для оценки прочности и обоснования несущей способности конструктивной системы ВЭУ арктического класса. Для этого предлагается внедрение моделей учета низких температур, снеговых воздействий и обледенения при проектировании ВЭУ, анализ их влияния на экстремальные нагрузки и усилия в опорных конструкциях ВЭУ для повышения точности моделирования несущей конструктивной системы.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

- разработка модели ветроколеса на основе импульсно-лопастного метода для формирования и анализа статических и динамических нагрузок на ступицу ветроагрегата в различных режимах работы с учетом арктических условий;
- разработка цифровой модели арктической ВЭУ, проведение нестационарного аэросервоупругого моделирования для определения экстремальных нагрузок на несущую конструктивную систему в различных расчетных ситуациях;
- уточненное моделирование НДС несущей конструктивной системы ВЭУ, оценка прочности и местной устойчивости элементов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе рассмотрена ВЭУ мощностью 100 кВт высотой 30 м с оптимизированной формой лопасти, разработанной СПбПУ для эксплуатации в арктических условиях [8]. Длина лопасти — 12 м, размеры гондолы —  $2 \times 1,3 \times 1,5$  м.

Несущая конструктивная система ВЭУ изготовлена из стали С355, включает стальную трубчатую конусную башню и конструкцию ростверка с трехточечным опиранием для передачи нагрузок на основание. Верхний диаметр башни — 1 м, диаметр нижнего сечения — 2 м, толщина стенки — 10 мм. Ростверк состоит из опорного элемента диаметром 2 м с толщиной стенки 30 мм, балок длиной 7 м с коробчатым сечением размерами  $1000 \times 320$  мм, выполненных

из горизонтальных пластин толщиной 40 мм и вертикальных пластин толщиной 30 мм. Ростверк высокий, для строительства на ММГ по I принципу, балки ростверка опираются на буроопускные стальные круглые сваи сечением  $426 \times 8$  мм. Глубина сезонного слоя — 1,6 м.

Схема исследуемой ВЭУ приведена на рис. 1, параметры режимов работы представлены в табл. 1.

Для реализации системного подхода при исследовании ВЭУ предлагается методика, включающая анализ нагрузок на ступицу на основе импульсно-лопастного метода, аэросервоупругое моделирование и уточненное моделирование опорных конструкций ВЭУ. Блок-схема (последовательность этапов) предлагаемой методики приведена на рис. 2.

С целью реализации методики формируется блок исходных сведений, включающий конструктивно-компоновочные параметры и параметры режимов работы ветроагрегата, а также природно-климатические характеристики места строительства. Климатические условия учитываются путем использования параметров плотности и вязкости воздуха для экстремальной отрицательной температуры, а также максимальной высоты снегового покрова на поверхности гондолы, полученных на основе метеорологических данных<sup>2</sup>.

В блоке 1 для анализа нагрузок на элементы ВЭУ используется импульсно-лопастный метод (ВЕМ). Этот метод выбран в связи с возможностью экспресс-оценки нагрузок на элементы ветроагрегата во всем диапазоне режимов работы ВЭУ. Метод объединяет теорию воздушного винта и теорию элемента лопасти, что позволяет оценить нагрузки на ветроколесо на основе аэродинамических характеристик участков лопастей с учетом законов сохранения массы и импульса ветрового потока посредством итеративного поиска решения.

В методе ВЕМ для каждого участка лопасти рассчитывается подъемная сила  $L$  и сила сопротивления  $D$  профиля лопасти:

$$L = C_L \frac{\rho V^2}{2} c; \quad (1)$$

$$D = C_D \frac{\rho V^2}{2} c, \quad (2)$$

где  $L$ ,  $D$  — подъемная сила и сила лобового сопротивления профиля, Н/м;  $C_L$ ,  $C_D$  — коэффициенты подъемной силы и сопротивления;  $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  — скорость ветра, м/с;  $c$  — длина хорды лопасти, м.

Схема сил, действующих на элемент лопасти, показана на рис. 3.

Существенное значение при расчете характеристик профиля имеет возможность обледенения,

<sup>2</sup> Специализированные массивы гидрометеорологических данных // ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». 2025. URL: <http://meteo.ru/dataMidas> FEA NX // Midas. URL: <https://midasoft.ru/products/midas-fea-nx/>

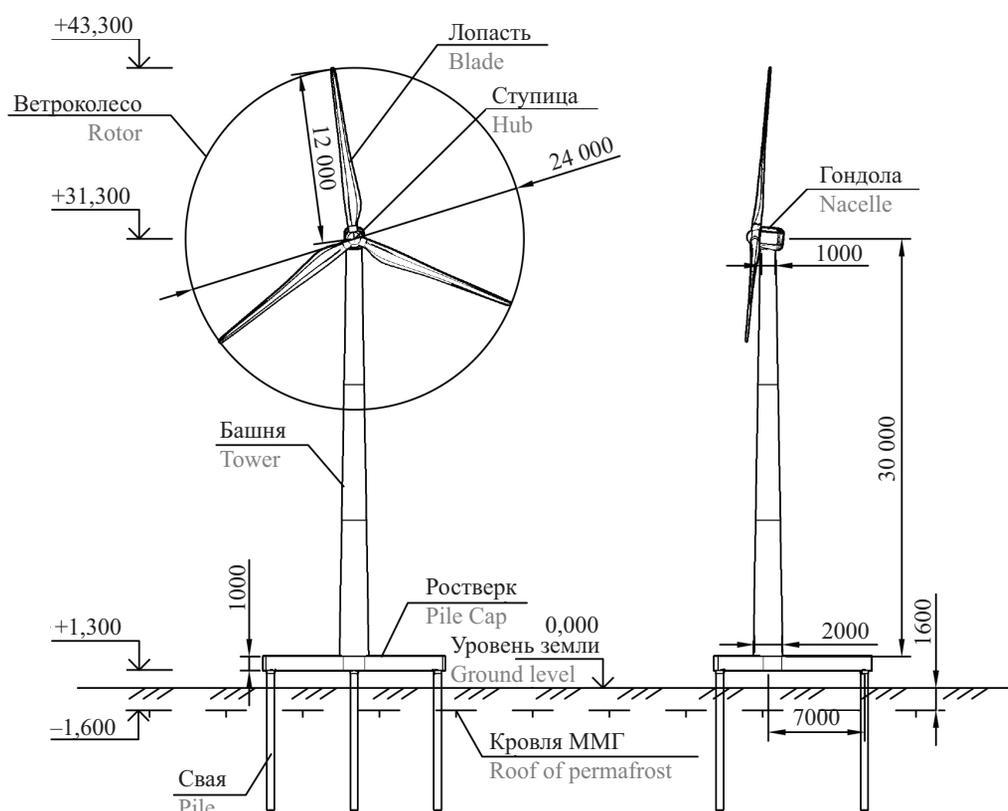


Рис. 1. Схема исследуемой ВЭУ

Fig. 1. Scheme of the investigated wind turbine

Табл. 1. Параметры режимов работы ВЭУ

Table 1. Parameters of wind turbine operation modes

Номинальная скорость ветра $V_r$ Rated wind speed $V_r$	8 м/с / m/s
Номинальная быстроходность $\lambda_r$ Rated tip speed ratio $\lambda_r$	8
Частота вращения ротора Rotor rotational speed	Переменная от 0 до 75 об/мин Variable from 0 to 75 rpm
Номинальная мощность ВЭУ $P_r$ Rated power of wind turbine $P_r$	100 кВт / kW
Рабочий диапазон скоростей ветра $V_{in}-V_{out}$ Operating wind speed range $V_{in}-V_{out}$	2–25 м/с / m/s
Ориентация на ветер (рыскание) Orientation to the wind (yaw)	Активная, против ветра Active, upwind
Регулирование мощности Power control	Активное, поворотом лопастей (pitch-контроль) Active, by rotating the blades (pitch control)
Управление при экстремальной скорости ветра Control at extreme wind speeds	Останов ротора, флюгерное положение лопастей Rotor stop, vane position of blades

при котором ухудшаются аэродинамические характеристики  $C_L$ ,  $C_D$  и добавляется масса льда по длине лопасти. Согласно рекомендациям международного стандарта ИЕС 64100–1, рассматриваются два варианта обледенения — равномерное обледенение всех лопастей и обледенение двух лопастей, вызывающее массовый и аэродинамический дисбаланс ротора.

Ухудшение аэродинамических характеристик профиля лопасти (снижение коэффициента подъемной силы  $C_L$ , увеличение коэффициента лобового сопротивления  $C_D$ ) рассчитывается по формулам (3), (4) в диапазоне углов атаки  $\alpha$  от  $-2^\circ$  до угла атаки, обеспечивающего максимальную подъемную силу, и экстраполируется на  $360^\circ$  методом Монтгомери [24]. Значения аэродинамических коэффициентов для

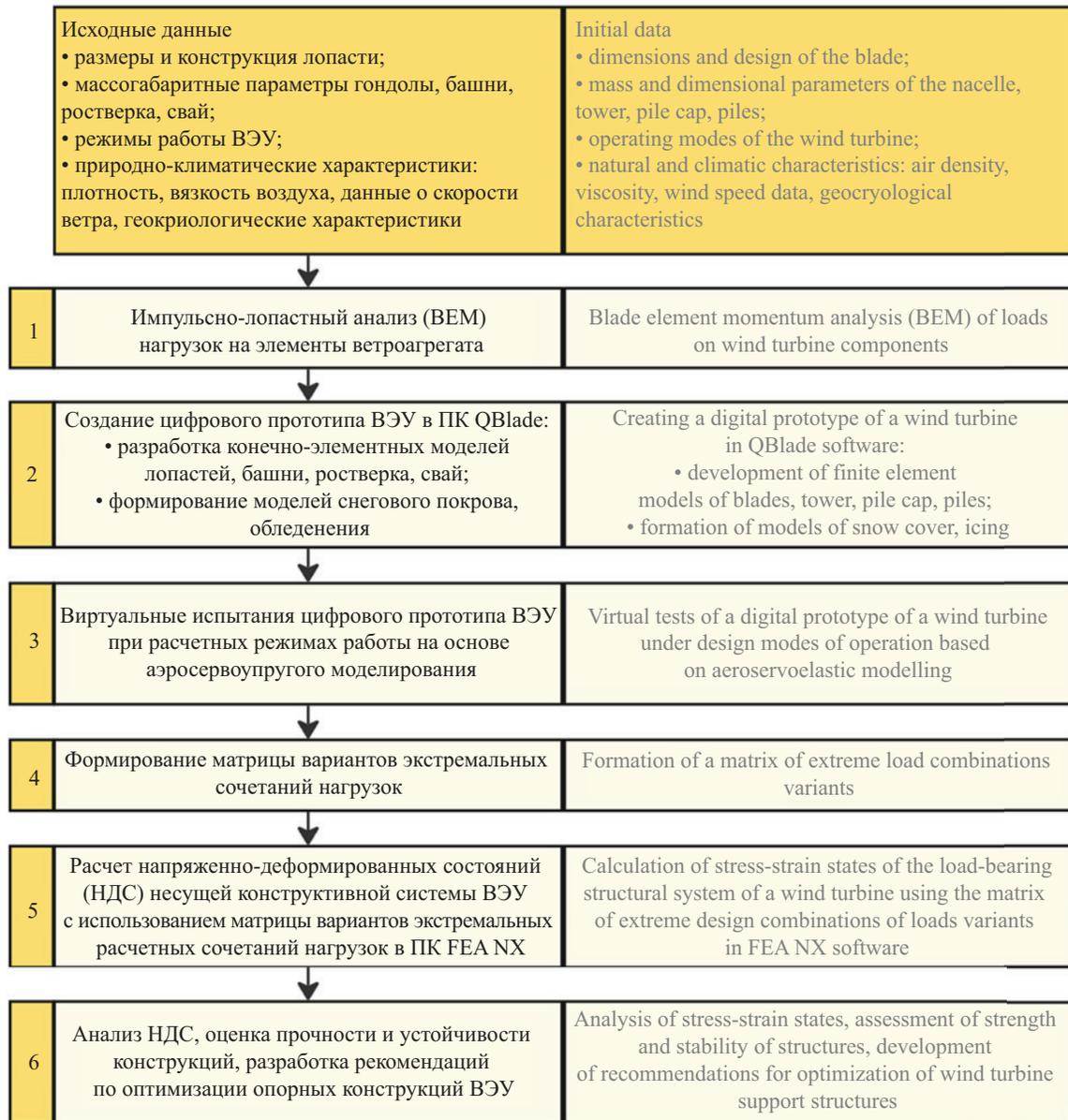


Рис. 2. Блок-схема методики исследования

Fig. 2. Block diagram of the research methodology

профиля в среднем сечении лопасти показаны на рис. 4:

$$C_{L,iced}(\alpha) = (-0,0014\alpha^2 - 0,0017\alpha + 0,9509) \cdot C_L(\alpha); \quad (3)$$

$$C_{D,iced}(\alpha) = (-0,019\alpha^2 + 3,115) \cdot C_D(\alpha). \quad (4)$$

Для расчета массы льда и ее распределения по длине лопасти используется формула (5). Соответствующее распределение массы льда по длине лопасти представлено на рис. 5:

$$M(r) = A \cdot c_{85\%} \cdot r, \quad (5)$$

где  $M$  — распределение массы на передней кромке лопасти ветроколеса, кг/м;  $A$  — 0,125 кг/м<sup>3</sup>;  $c_{85\%}$  —

длина хорды на 85 % радиуса ветроколеса, м;  $r$  — радиальное положение от оси ветроколеса, м.

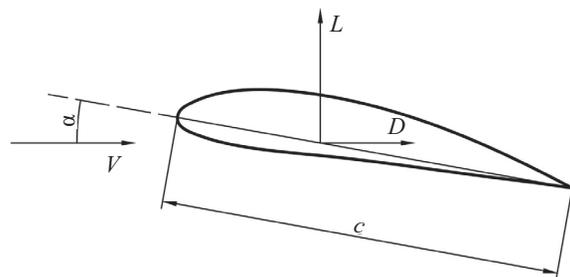


Рис. 3. Схема сил, действующих на элемент лопасти

Fig. 3. Scheme of forces acting on the blade element

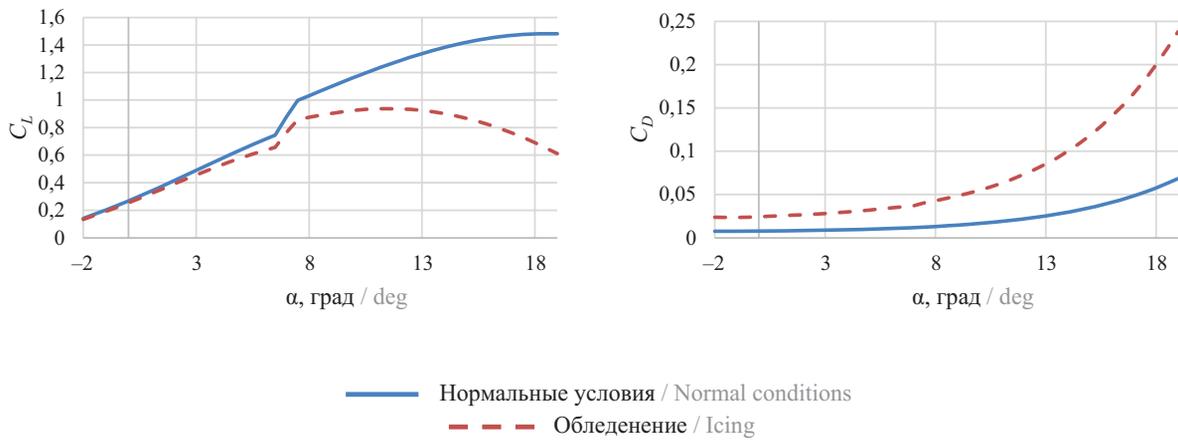


Рис. 4. Влияние обледенения на аэродинамические характеристики профиля лопасти

Fig. 4. Effect of icing on aerodynamic characteristics of the blade profile

С целью учета смещенного центра масс ветроколеса при неравномерном обледенении лопастей добавляется центробежная сила, вычисляемая по формуле:

$$P_{ц} = m_{БК} \cdot e \cdot \omega^2, \quad (6)$$

где  $P_{ц}$  — центробежная сила, Н;  $m_{БК}$  — масса ветроколеса, кг;  $e$  — расстояние от оси вращения до центра масс ветроколеса в плоскости вращения (эксцентриситет), м;  $\omega$  — угловая скорость ветроколеса, рад/с.

Для оценки влияния обледенения на нагрузку по результатам ВЕМ-анализа определяются коэффициенты тяги  $C_T$  ветроколеса, а также рассчитывается сила лобового давления на ветроколесо (сила тяги)  $T$  в различных режимах работы по формуле (7):

$$T = C_T \frac{\rho V^2}{2} S, \quad (7)$$

где  $S$  — ометаемая площадь ветроколеса,  $m^2$ .

Таким образом, в блоке 1 разрабатывается аэродинамическая модель ветроколеса, позволяющая учесть режимы работы и обледенение лопастей.

В блоке 2 создается цифровой прототип ВЭУ, который включает модель ветроколеса на основе ВЕМ и упругую динамическую конечно-элементную модель (КЭМ) ВЭУ (рис. 6). Конечно-элементная модель состоит из:

- моделей лопастей, башни, балок ростверка и свай, формируемых стержневыми конечными элементами (КЭ) Эйлера-Бернулли;
- моделей снегового покрова и обледенения, формируемых сосредоточенными массами в узлах соответствующих моделей элементов.

При создании КЭМ лопасти масса льда при обледенении учитывается добавлением сосредоточенных масс в узлах конечно-элементной модели по длине лопасти (рис. 6, с) в соответствии с распределением погонной массы льда, показанной на рис. 5. К рассмотрению приняты варианты — без обледенения, с обледенением всех лопастей и с обледенением

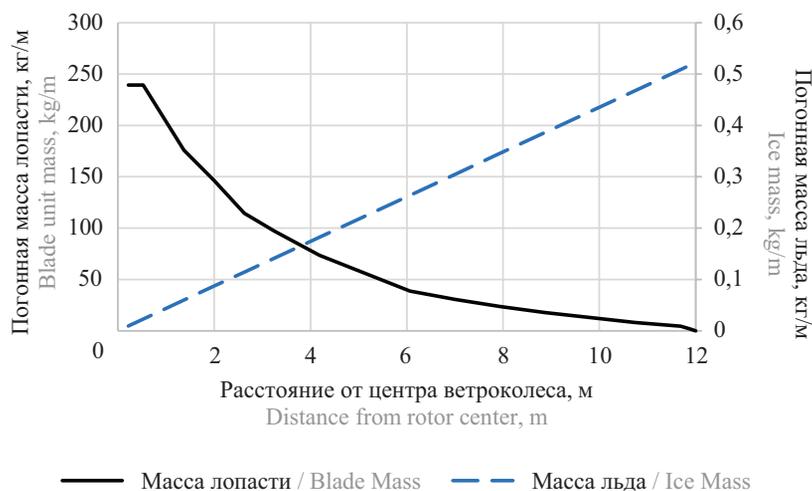


Рис. 5. Распределение массы лопасти и льда

Fig. 5. Blade and ice mass distribution

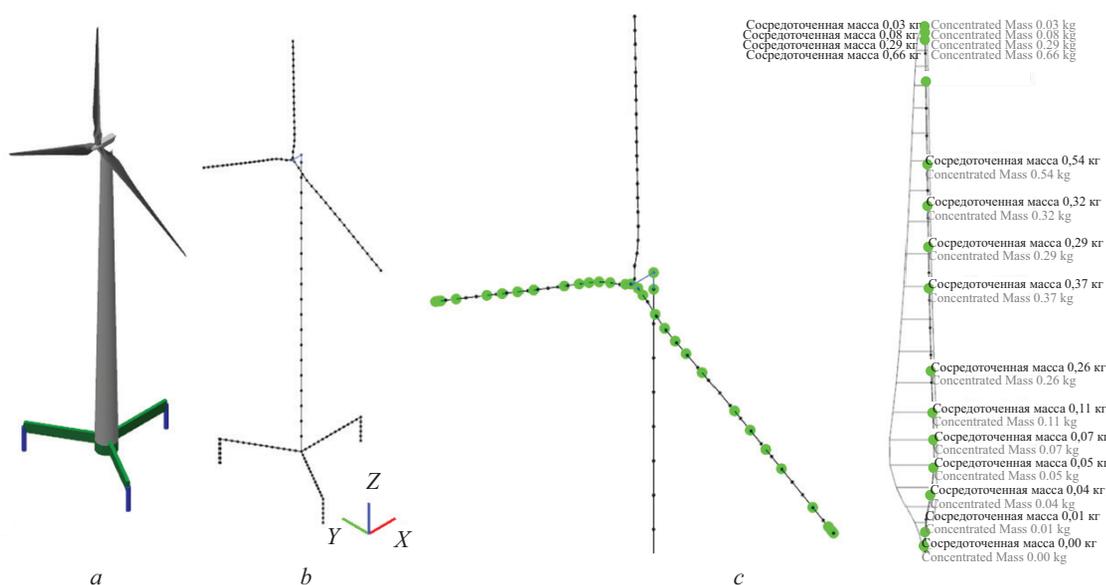


Рис. 6. Цифровой прототип ВЭУ: *a* — визуализация ВЭУ; *b* — КЭМ ВЭУ; *c* — схема расположения сосредоточенных масс вдоль лопастей для моделирования обледенения

Fig. 6. Digital prototype of wind turbine: *a* — visualization of wind turbine; *b* — FE-model of wind turbine; *c* — scheme of lumped masses along the blades for icing simulation

двух лопастей. В качестве граничного условия опирания ВЭУ принято жесткое закрепление свай на отметке кровли ММГ, жесткость грунта сезонного слоя не учитывается.

В блоке 3 для виртуальных испытаний цифрового прототипа ВЭУ при различных режимах работы моделируется нестационарный турбулентный ветровой поток путем создания синтезированных матриц скоростей ветра на основе спектра турбулентных пульсаций, методика изложена в труде [3]. В рамках настоящего исследования рассматриваются два режима ВЭУ — выработка электроэнергии на максимальной рабочей скорости ветра  $V_{out} = 25$  м/с по модели нормальной турбулентности (NTM в терминах IEC) с расчетной интенсивностью  $I_{ref} = 0,18$  и парковка при действии шторма по модели экстремальной скорости ветра с 50-летней повторяемостью  $V_{e50} = 60$  м/с (EWM в терминах IEC).

В моделях учитывается динамический срыв вихрей по модели Ойя [25], аэродинамическое затенение башни [26], а также поправки для учета трехмерного характера обтекания лопастей [27] и коэффициент конечных потерь Прандтля [28].

Каждый режим моделируется с учетом режима работы ВЭУ и управляющих воздействий (частота вращения ротора, угол поворота лопастей). Скорость вращения ветроколеса и угол поворота лопастей на скорости ветра, равной 25 м/с, составляют 75 об/мин и 24,4° соответственно, на скорости ветра 60 м/с — 0 об/мин и 82,3° (парковка с флюгерным положением лопастей).

По результатам моделирования в блоке 3 анализируется общая устойчивость несущей конструктивной системы ВЭУ, а также определяются динамические нагрузки на конструктивные элементы во временной области.

В блоке 4 полученные данные обрабатываются и составляется матрица экстремальных сочетаний нагрузок в верхней точке башни. Для этого по каждой из 6 составляющих нагрузок (3 силы и 3 момента) производится поиск максимального значения среди всех расчетных случаев и соответствующие им значения оставшихся 5 составляющих.

В блоке 5 создается модель несущей конструктивной системы (рис. 7) в сертифицированном ПК для моделирования строительных конструкций, зданий и сооружений FEA NX<sup>3</sup>. В модели используются четырехугольные плоские КЭ — оболочки размером до 100 мм, расчетная сетка башни состоит из 19 338 КЭ, ростерка и свай из 7032 КЭ. Нагрузка в верхней точке башни прикладывается в виде сосредоточенных силы и момента и передается на узлы КЭ башни посредством абсолютно жесткого тела, ветровая нагрузка на башню моделируется распределенной по высоте согласно методике СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

С использованием модели производится расчет НДС при расчетных вариантах экстремальных сочетаний нагрузок.

В блоке 6 выполняются анализ НДС несущей конструктивной системы и оценка несущей способности элементов конструкции, которые включают:

- анализ напряжений в несущих конструкциях и проверку обеспечения условия прочности;

<sup>3</sup> Midas FEA NX // Midas. URL: <https://midasoft.ru/products/midas-fea-nx/>

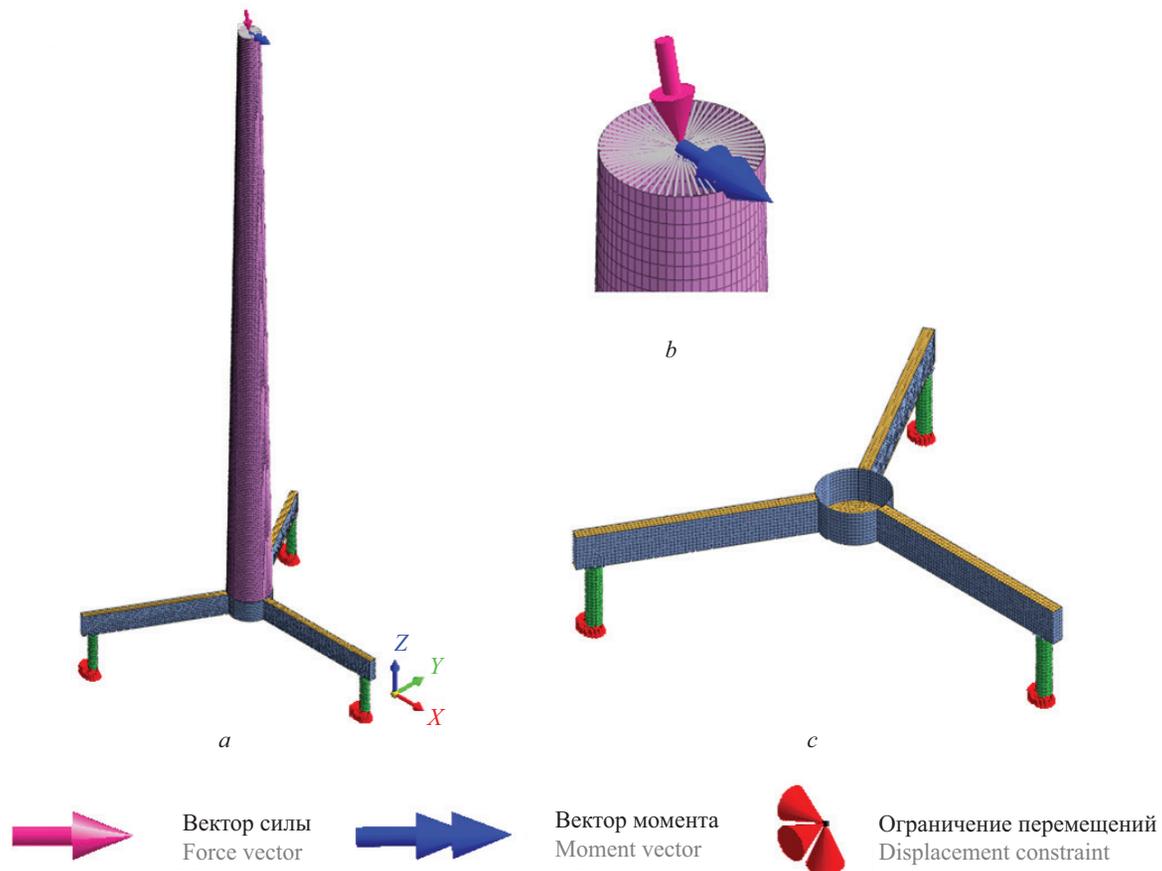


Рис. 7. Конечно-элементная модель несущей конструктивной системы ВЭУ: *a* — общий вид модели; *b* — узел приложения нагрузок в верхнем сечении башни; *c* — модель ростверка

Fig. 7. Finite element model of the wind turbine load-bearing structural system: *a* — general view of the model; *b* — node of load application in the upper section of the tower; *c* — model of the pile cap

- анализ местной устойчивости конструктивных элементов;
- выявление малонагруженных зон для потенциальной оптимизации конструктивного решения.

Комплексный подход, состоящий из всех вышеуказанных этапов, обеспечивает многофакторность анализа и высокую точность результатов. Допущения методики являются предположения о равномерном распределении обледенения вдоль лопасти и снегового покрова на гондоле, использование типовых геокриологических характеристик и упрощенного граничного условия без учета податливости ММГ.

Для оценки несущей способности опорных конструкций используются следующие критерии:

- эквивалентные напряжения не должны превышать предела текучести стали;
- коэффициенты запаса в упругом расчете устойчивости не должны превышать 10;
- коэффициент использования прочности материала (отношение эквивалентных напряжений к пределу текучести стали) должен стремиться к 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках исследования определяются значения динамических и статических нагрузок на элементы

ВЭУ в нормальных условиях и при обледенении лопастей. На рис. 8, *a* приведена схема сил, действующих на ступицу от ветроколеса, на рис. 8, *b* — схема сил и моментов, действующих на верхнюю точку башни.

Важный аспект исследования — определение зависимостей коэффициента тяги, осевых и горизонтальных статических и динамических нагрузок, действующих на ступицу ветроколеса.

Зависимости коэффициента тяги ветроколеса  $C_T$  из формулы (7) от быстроходности  $\lambda$  в нормальных условиях и при обледенении лопастей приведены на рис. 9.

Из рис. 9 видно, что обледенение лопастей снижает коэффициент тяги, что соотносится с исследованием [22], где также зафиксировано снижение силы тяги при обледенении. По результатам на рис. 9 установлено, что для рассматриваемой ВЭУ при угле поворота лопастей  $0^\circ$  в зависимости от быстроходности  $\lambda$  коэффициент тяги  $C_T$  может снижаться до 40 %.

Зависимость средней осевой силы, действующей на ступицу ветроколеса  $F_x^h$  в диапазоне скоростей ветра 0–60 м/с для рассматриваемой ВЭУ с учетом заданного алгоритма управления мощностью (pitch-контроля), приведена на рис. 10.

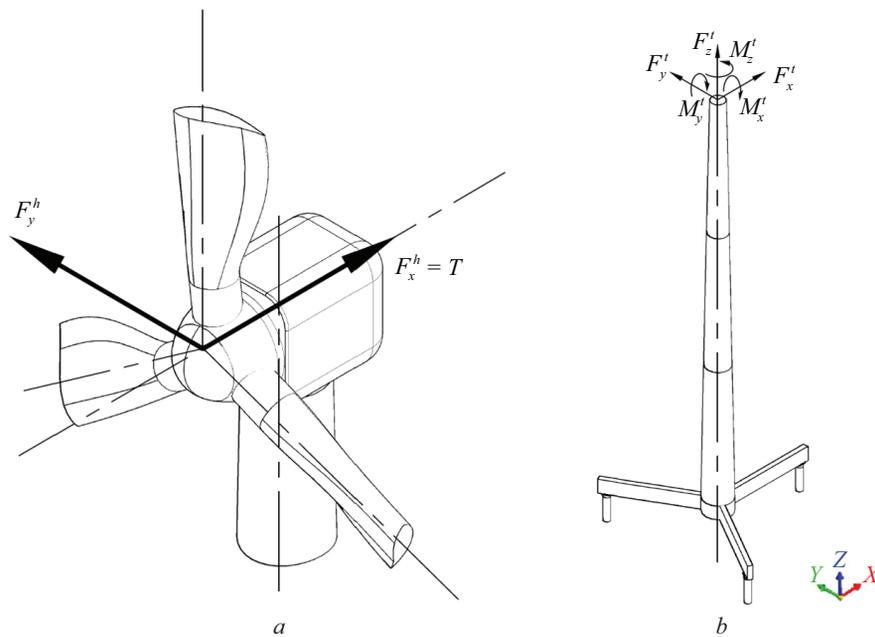


Рис. 8. Схема сил, действующих на: *a* — ступицу ветроколеса; *b* — несущую конструктивную систему

Fig. 8. Scheme of forces acting on: *a* — rotor hub; *b* — supporting structural system

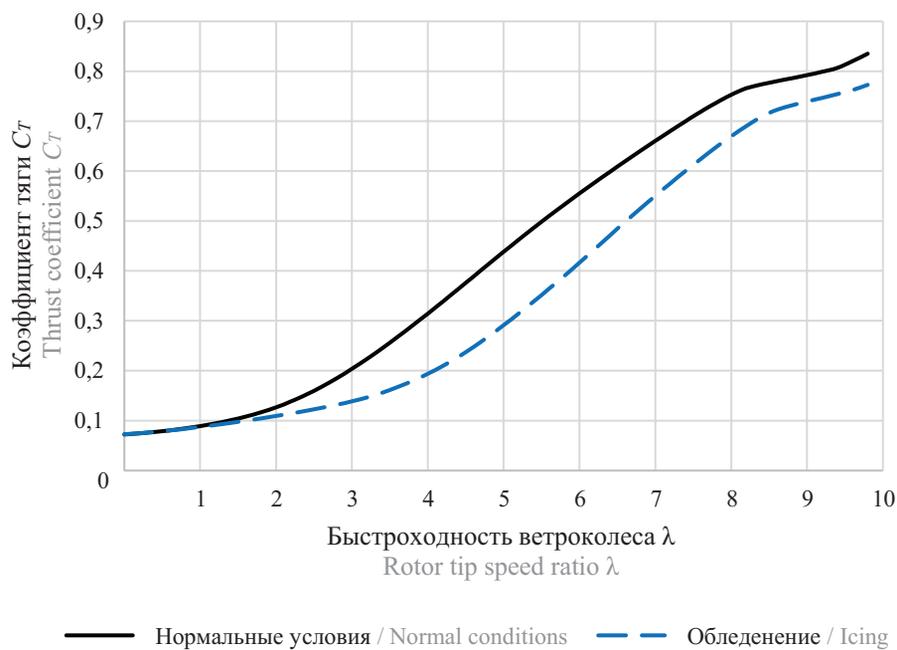


Рис. 9. Зависимость коэффициента тяги ветроколеса от быстроходности при угле установки лопастей  $0^\circ$

Fig. 9. Dependence of the rotor thrust coefficient on the tip speed ratio at a blade angle of  $0^\circ$

Из рис. 10 видно, что с учетом алгоритмов системы управления обледенение снижает осевую силу на ступицу ветроколеса в диапазоне скоростей ветра 0–17 м/с до 11 %, после чего с ростом скорости ветра обледенение увеличивает нагрузку до 35 % при скорости 25 м/с. В состоянии парковки при штормовом ветре обледенение увеличит силу тяги на 30 %, что приведет к превышению расчетных нагрузок при нормальных условиях и может стать причиной аварийного состояния конструктивных

элементов ВЭУ. Подобная картина изменения нагрузок в рабочем диапазоне скоростей ветра при обледенении была зафиксирована во время натуральных исследований [29] ВЭУ Senvion MM92 мощностью 2 МВт около г. Квебека (Канада).

На рис. 11 приведен график изменения во времени горизонтальной силы  $F_y^h$ , вызванной аэродинамическими и массовыми дисбалансами при неравномерном обледенении ветроколеса (2 из 3 лопастей).

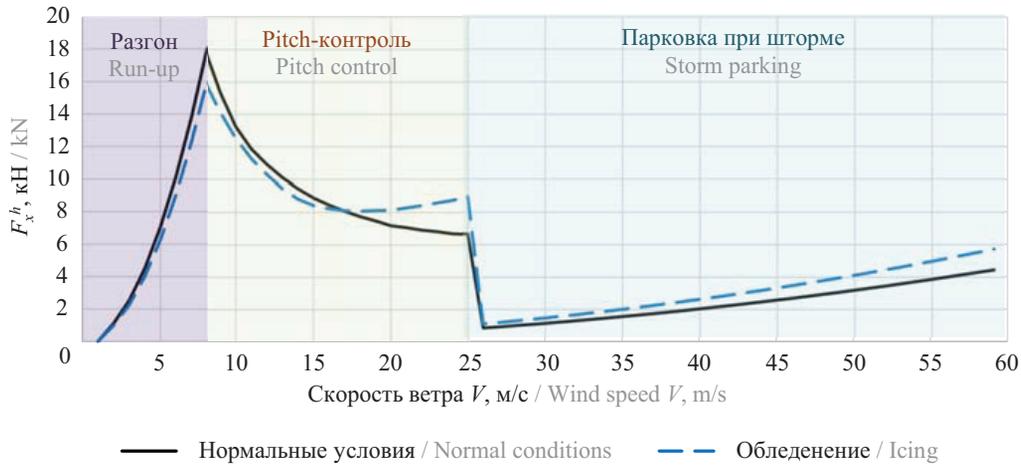


Рис. 10. Зависимость осевой нагрузки на ступицу  $F_x^h$  от скорости ветра с учетом режимов работы ВЭУ  
 Fig. 10. Dependence of the axial load on the hub  $F_x^h$  on the wind speed with regard to wind turbine operation modes

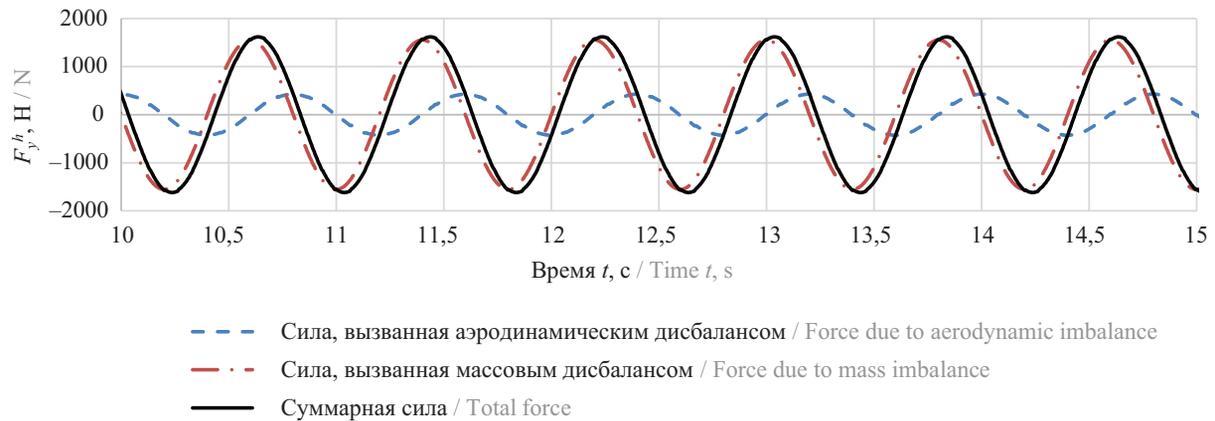


Рис. 11. Горизонтальная нагрузка на ступицу  $F_y^h$ , вызванная неравномерным обледенением лопастей  
 Fig. 11. Horizontal load on the hub  $F_y^h$ , due to non-uniform blade icing

Периодическая горизонтальная нагрузка на ступицу  $F_y^h$ , вызванная аэродинамическим дисбалансом, для рассмотренной ВЭУ при номинальной скорости вращения в 3 раза ниже, чем нагрузка, вызванная массовым дисбалансом. При этом составляющие имеют фазовый сдвиг, равный полупериоду, поэтому максимальное значение нагрузки определяется преимущественно массовым дисбалансом.

Данный результат совпадает с результатами натурных исследований [29] ВЭУ Nordex N100 мощностью 2,5 МВт в Швеции, где при обледенении лопастей наблюдалось повышение динамической нагрузки в боковом направлении, а также установлено преобладающее влияние дисбаланса от массы льда на нагрузки по сравнению с аэродинамическим дисбалансом.

По результатам нестационарного аэросервоупругого моделирования получены значения динамических нагрузок во времени. На рис. 12 для примера представлены реализации динамических нагрузок  $F_x^t$  в верхней точке башни для различных расчетных ситуаций на временном интервале длительностью 5 с.

Динамические нагрузки имеют случайный, непериодический характер. Для детального анализа нагрузок составляющие динамических нагрузок (3 силы  $F_x^t$ ,  $F_y^t$ ,  $F_z^t$  и 3 момента  $M_x^t$ ,  $M_y^t$ ,  $M_z^t$ ) в верхней точке башни обработаны и определены спектральные плотности реализаций для каждой составляющей (рис. 13).

Из рис. 13 видно, что динамические нагрузки имеют наибольшую интенсивность на определенных частотах:

- в диапазоне от 0 до 0,5 Гц определяются воздействием пульсаций ветра;
- в диапазоне около 0,89 Гц определяются первыми изгибными частотами собственных колебаний несущей конструктивной системы;
- в диапазоне около 1,25 Гц определяются оборотной частотой ветроколеса  $1P$ , связано с дисбалансами ветроколеса и наблюдается только в расчетном случае с неравномерным обледенением в режиме выработки электроэнергии при  $V < 25$  м/с;
- в диапазоне около 3,75 Гц определяются лопастной частотой  $3P$  в режиме выработки электро-

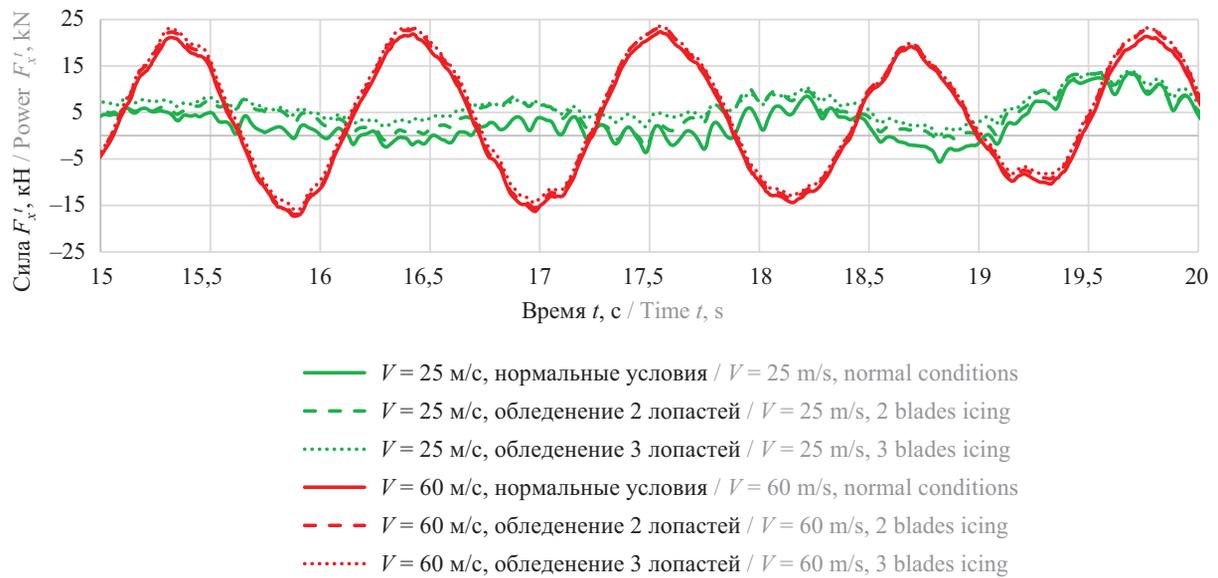


Рис. 12. Сила  $F'_x$  в верхней точке башни

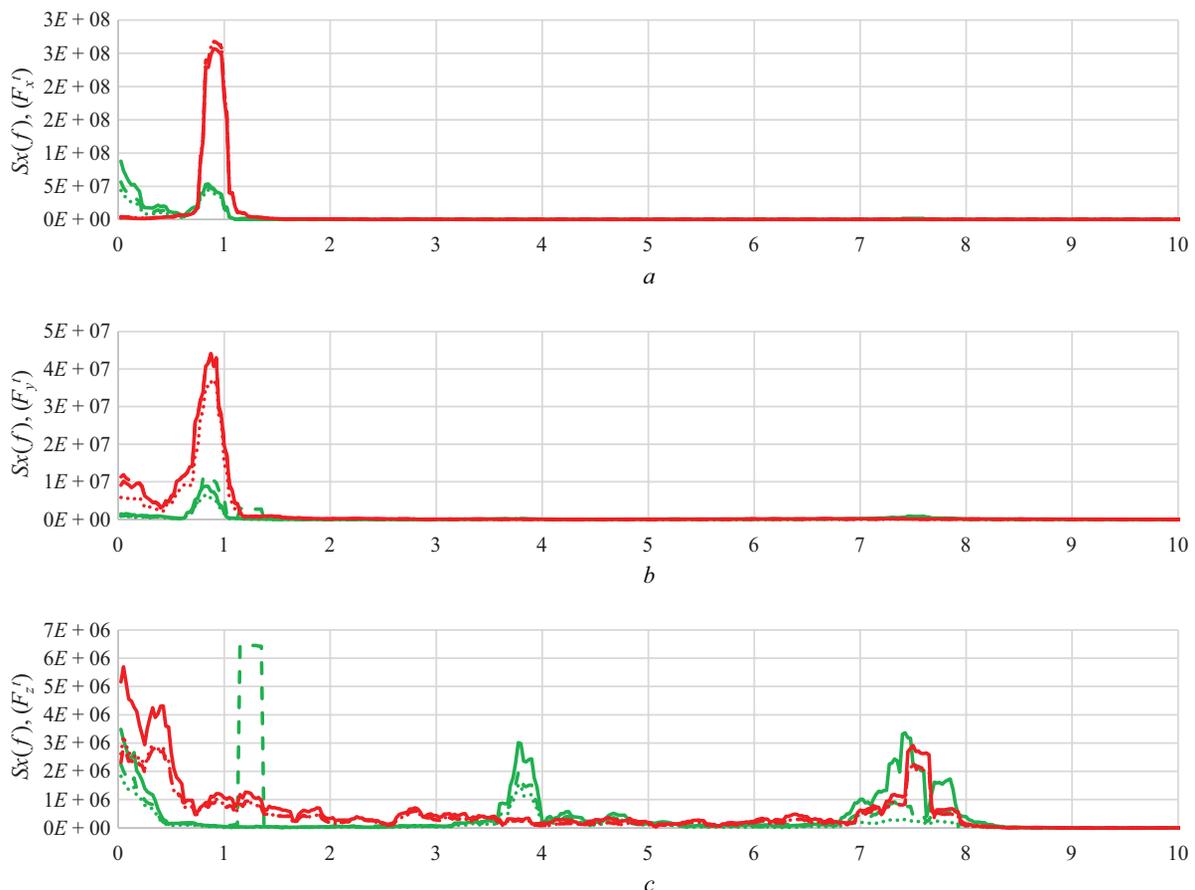
Fig. 12. Force  $F'_x$  at the tower top

энергии при аэродинамическом затенении вращающейся лопасти башней;

- около 7,5 Гц, что соответствует второй лопастной частоте  $6P$ .

Для валидации результатов моделирования проведено сравнение с результатами исследования [30] арктической ВЭУ Northern Power 100 Arctic мощно-

стью 100 кВт. Сравнение выполненных исследований с результатами [30] показало, что повышенные динамические нагрузки также возникают на первой собственной частоте колебаний ВЭУ, оборотной  $1P$  и лопастной  $3P$  частотах, что подтверждает достоверность произведенного аэроупругого моделирования ВЭУ.



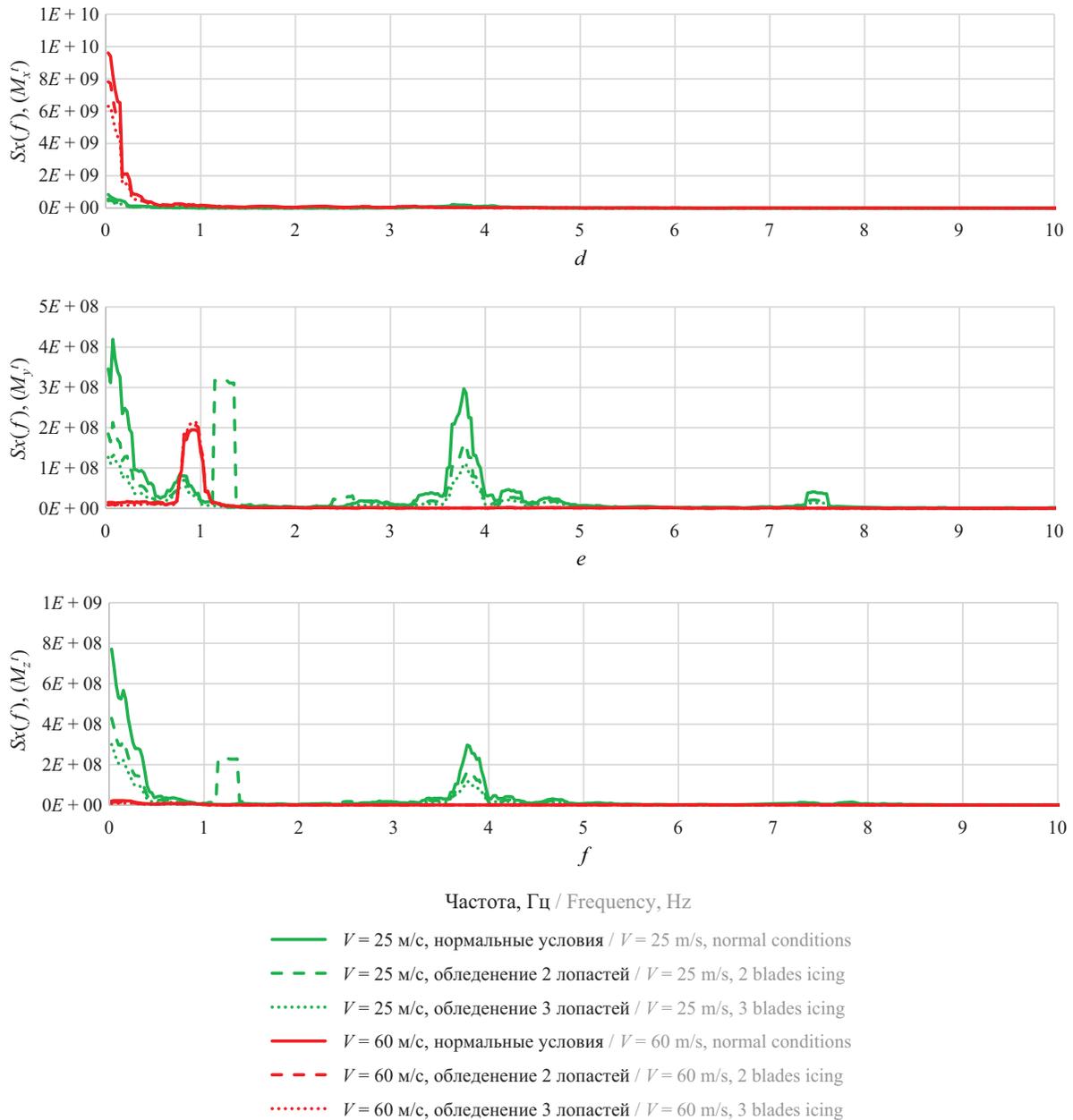


Рис. 13. Спектральные плотности по составляющим нагрузок в верхней точке башни:  $a, b, c$  — силы;  $d, e, f$  — моменты  
 Fig. 13. Spectral densities by components of loads at the tower top:  $a, b, c$  — forces;  $d, e, f$  — moments

Динамические нагрузки, вызванные вынужденными колебаниями под действием низкочастотных пульсаций ветра и вращения колеса на оборотной и лопастных частотах ( $1P, 3P, 6P$ ), неизбежны и не могут быть снижены за счет оптимизации несущих конструкций. Тем не менее при детальном анализе результатов моделирования установлено, что динамическая реакция в вертикальном направлении  $F_z'$  связана с возникновением резонанса второй лопастной частоты  $6P$  и пятой частоты собственных колебаний несущей конструктивной системы, что ведет к необходимости увеличения жесткости фундамента.

По результатам обработки реализаций определена матрица вариантов экстремальных сочетаний

нагрузок, приведенная в табл. 2, включающая сочетания с максимальными и минимальными значениями каждой составляющей, а также максимальными значениями результирующей силы и момента среди всех симуляций.

Из табл. 2 видно, что экстремальные значения составляющих нагрузок возникают почти во всех расчетных ситуациях, кроме режима выработки электроэнергии ( $V = 25$  м/с) при полном обледенении. Для рассматриваемой ВЭУ при равномерном обледенении реализуются только 2 варианта экстремальных сочетаний, в то время как при обледенении двух лопастей реализуются 4 экстремальных сочетания, можно сделать вывод, что неравномерное обледенение ветроколеса является более неблаго-

Табл. 2. Матрица вариантов экстремальных сочетаний нагрузок в верхней точке башни

Table 2. Matrix of extreme loads combinations variants at the tower top

Вариант Variant	$F'_x$ , кН / kN	$F'_y$ , кН / kN	$F'_z$ , кН / kN	$M'_x$ , кНм / kNm	$M'_y$ , кНм / kNm	$M'_z$ , кНм / kNm	$F'_{sp}$ , кН / kNm	$M'_{sp}$ , кНм / kNm	Скорость ветра $V$ , м/с / Wind speed $V$ , m/s	Обледенение Icing	
1	23,72	-5,42	-80,54	249,22	-5,69	3,85	24,33	249,29	60	3 лопасти 3 blades	
2	-17,32	-6,00	-82,99	223,97	-46,17	5,43	18,33	228,68		60	Отсутствует None
3	-7,17	11,02	-85,55	226,72	-29,68	-1,85	13,15	228,66			60
4	13,85	-13,73	-82,33	248,98	-20,60	6,87	19,50	249,83	25		
5	15,88	-3,49	-75,55	253,02	-12,47	3,69	16,26	253,32		25	
6	2,37	-1,14	-89,79	-4,07	-46,01	36,72	2,63	46,19			60
7	14,90	-0,61	-86,83	332,71	-12,54	2,64	14,91	332,95	25		
8	9,53	-4,17	-83,39	-32,54	-6,53	26,09	10,40	33,19		25	
9	9,33	-3,91	-80,31	31,19	48,78	5,64	10,12	57,90			60
10	7,39	0,72	-84,47	2,11	-56,03	20,60	7,42	56,07	60		
11	11,51	-1,57	-89,23	32,24	-3,57	58,66	11,62	32,44		60	
12	7,05	0,60	-81,61	28,67	10,54	-51,30	7,08	30,55			60
13	22,07	-12,25	-80,69	238,43	-10,72	-0,06	25,24	238,67	60		
14	14,90	-0,61	-86,83	332,71	-12,54	2,64	14,91	332,95		60	

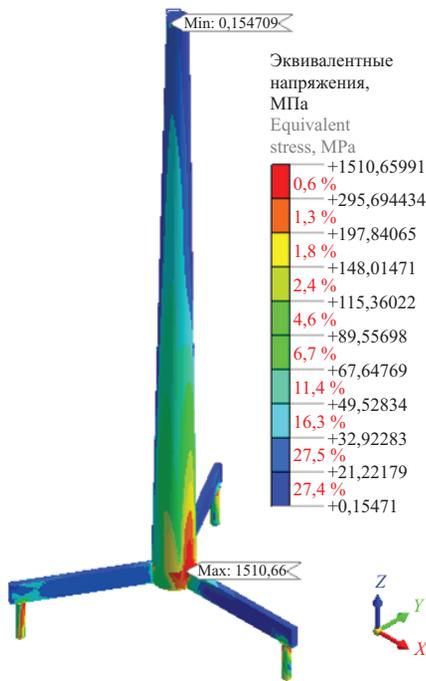


Рис. 14. Изополя эквивалентных напряжений в несущей конструктивной системе для варианта сочетаний нагрузок 13

Fig. 14. Isopoles of equivalent stresses in the supporting structural system for the variant of load combination 13

приятным с точки зрения экстремальных нагрузок. Наибольшее значение результирующей горизонтальной силы в верхней точке башни  $F_{xy}^t$  зафиксировано при обледенении двух лопастей и штормовом ветре, результирующем изгибающем моменте  $M_{xy}^t$  при штормовом ветре без обледенения лопастей.

С целью оценки прочности конструктивных элементов получены изополя напряжений для каждого варианта экстремального сочетания нагрузок (рис. 14). При анализе НДС установлено, что максимальные эквивалентные напряжения составляют 1510 МПа, что значительно превышает предел текучести стали С355, равный 340 МПа.

Как видно из рис. 14, зоны превышения предела текучести стали локализуются в местах концентрации напряжений в опорной зоне башни, а также в оголовках свай. Для уменьшения напряжений предложен вариант усиления опорной зоны пластинами толщиной 15 мм. Усиление опорной зоны пластинами позволило снизить максимальные напряжения до 301,58 МПа (рис. 15), что обеспечило соблюдение условия прочности. Дальнейший анализ производился для усиленного варианта.

Для анализа прочности элементов конструкции обработаны данные о распределении напряжений во всех расчетных случаях, получена обобщенная картина максимальных эквивалентных напряжений в узлах модели (рис. 16). Максимальные напряжения во всех конструктивных элементах не превы-

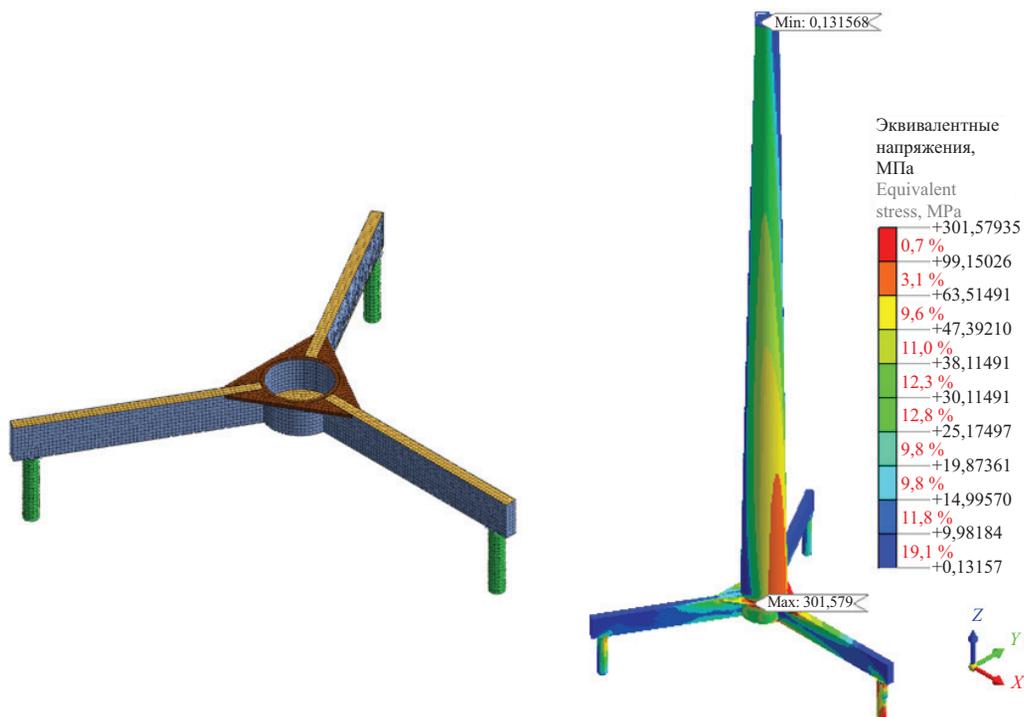


Рис. 15. Конструктивное решение фундамента с усилением пластинами и изополя эквивалентных напряжений в несущей конструктивной системе

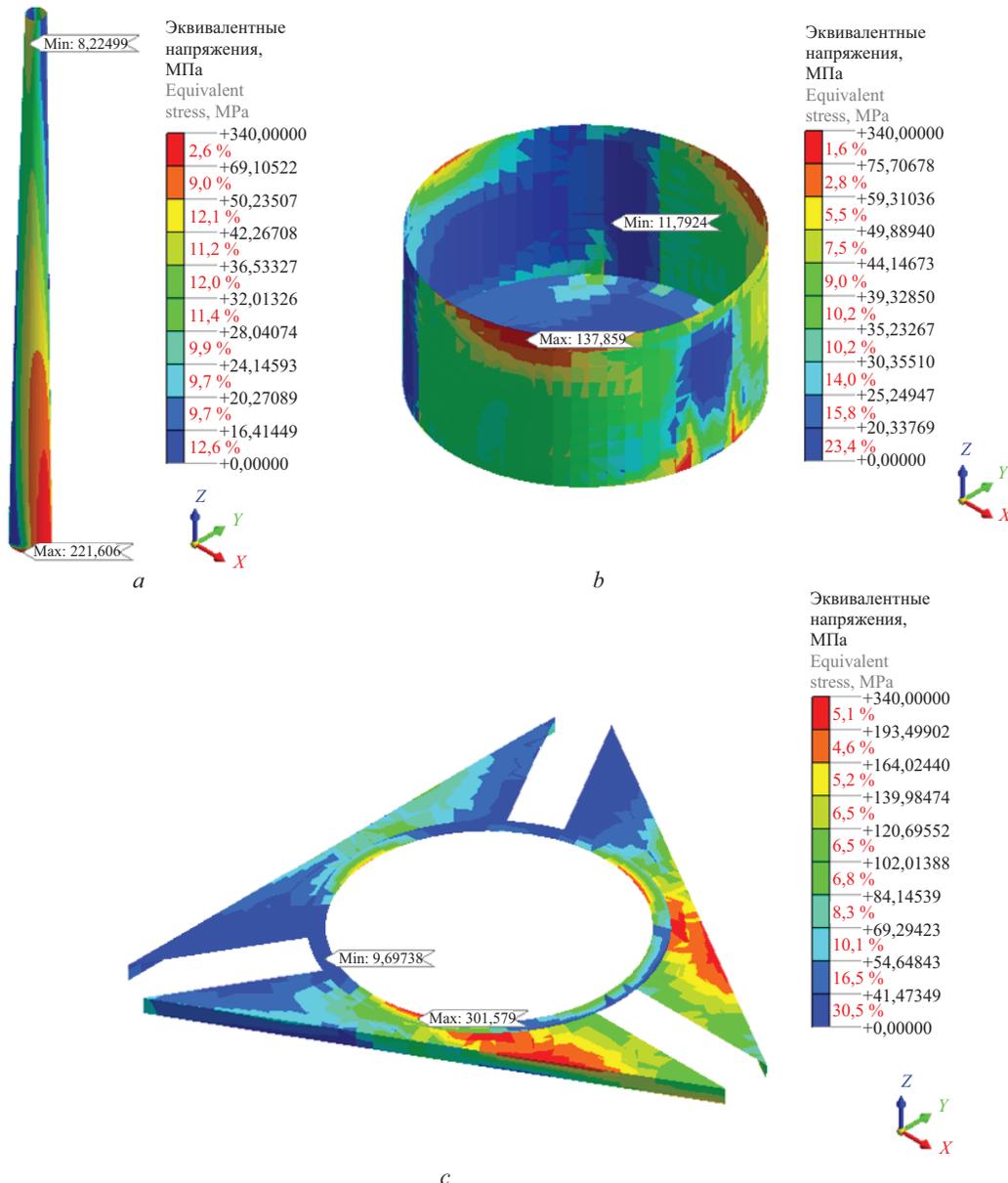
Fig. 15. Structural solution of the foundation with plate reinforcement and isopoles of equivalent stresses in the supporting structural system

шают предела текучести стали, условие прочности выполняется, при этом наибольшее напряжение зафиксировано в опорной зоне в пластине усиления (рис. 16, с) в расчетной ситуации с максимальной результирующей силой  $F'_{xy}$  ( $V = 60$  м/с, обледенение двух лопастей).

Для расчетного сочетания, вызывающего наибольшие напряжения в конструктивных элементах, выполнен линейный анализ устойчивости. По результатам анализа устойчивости установлено, что устойчивость конструктивной системы при действующих экстремальных нагрузках обеспечена. Устойчивость по наиболее вероятным формам обеспечена с коэффициентом запаса 13,5 для локальной устойчивости пластины усиления и коэффициентом запаса 16 для локальной устойчивости стенки башни.

По результатам анализа НДС несущей конструктивной системы определено, что наиболее нагруженными узлами являются узлы соединения

башни с ростверком и балки ростверка со сваями, что соотносится с работами [11, 12]. При этом видно, что в конфигурации несущей конструктивной системы с трехточечным опиранием из исследования [12] наблюдается несколько более равномерное распределение напряжений, чем в рассматриваемом конструктивном решении, где часть материала балок ростверка мало вовлекается в работу, что свидетельствует о целесообразности перераспределения материала для оптимизации конструктивного решения. Наименее нагруженные — верхние зоны балок ростверка в зоне опирания на сваи, где целесообразно снизить количество материала. Однако уменьшение количества материала в малонагруженных зонах приведет к изменению жесткости несущих конструкций, поэтому при оптимизации конструктивных решений необходимо также соблюдать ограничение по жесткости для снижения резонансных эффектов (рис. 17).



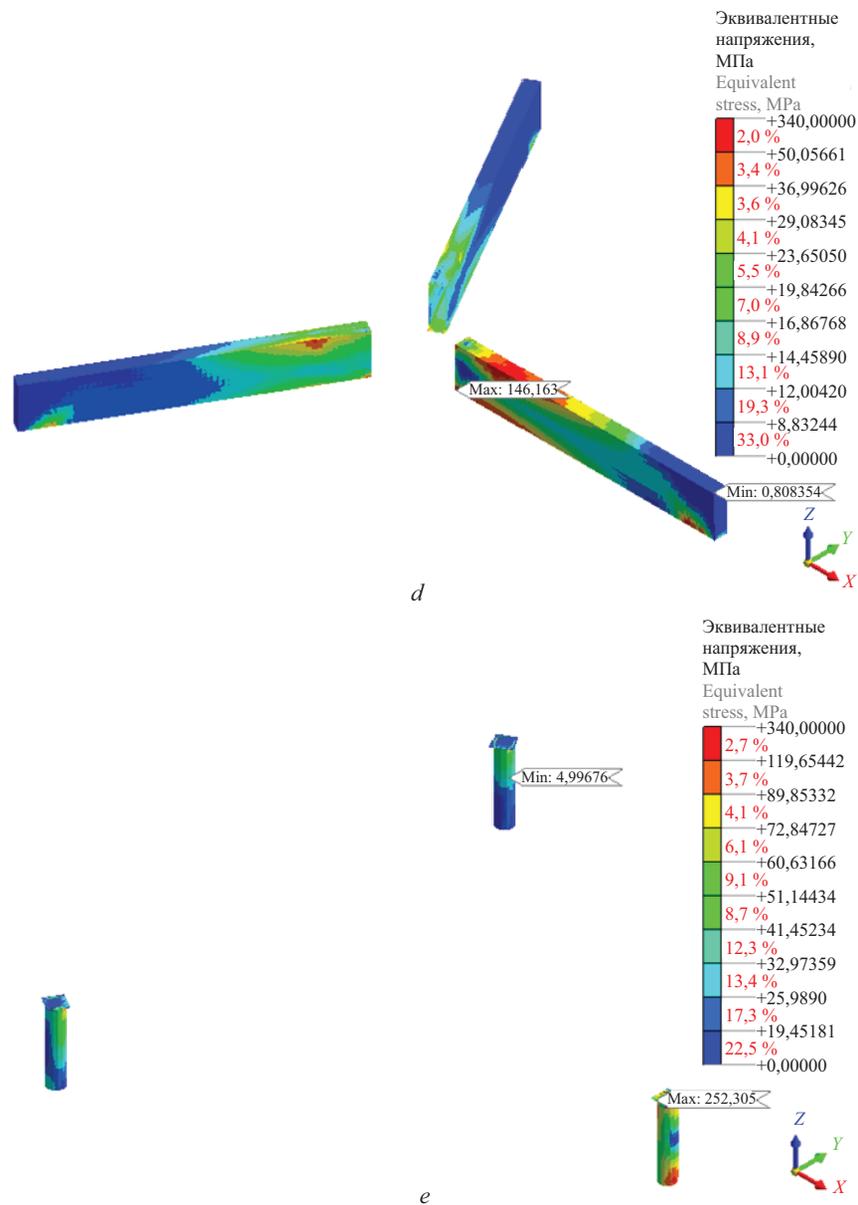


Рис. 16. Обобщенная картина максимальных напряжений в отдельных конструктивных элементах: *a* — башня; *b* — опорный элемент; *c* — пластины усиления; *d* — балки ростверка; *e* — оголовки свай

Fig. 16. Summarized isopoles of maximum stresses in individual structural elements: *a* — tower; *b* — support element; *c* — reinforcement plates; *d* — pile cap beams; *e* — top of piles



Рис. 17. Визуализация арктической ВЭУ с предложенным вариантом опорных конструкций

Fig. 17. Visualization of the Arctic wind turbine with the proposed variant of support structures

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенного исследования разработана методика аэросервоупругого моделирования ВЭУ с учетом климатических особенностей арктической зоны. В рамках исследования были проведены расчеты аэродинамических и инерционных нагрузок на конструктивные элементы ВЭУ мощностью 100 кВт при различных эксплуатационных условиях, включая климатические условия, такие как снеговые и гололедные нагрузки, турбулентность ветра и низкие температуры.

Основными результатами работы являются:

- методика аэросервоупругого моделирования ВЭУ с учетом турбулентности ветра, снеговых, гололедных, температурных воздействий в арктической зоне РФ, эксплуатационных воздействий и режимов работы;

- закономерности изменения нагрузок на ступицу при обледенении ветроколеса с учетом режимов работы ВЭУ. Показано, что обледенение снижает нагрузку на ветроколесо рассматриваемой ВЭУ при скоростях ветра до 17 м/с до 11 %, после чего при скоростях ветра выше 17 м/с, напротив, повышает до 35 %. Также установлено, что при неравномерном обледенении возникает аэродинамический и массовый дисбаланс, вызывающий динамическую нагрузку с оборотной частотой, которая формируется преимущественно в связи со смещением центра тяжести ветроколеса;

- сформирована матрица вариантов экстремальных сочетаний нагрузок на несущую конструктивную систему на примере арктической ВЭУ мощностью 100 кВт высотой 30 м;

- выполнен уточненный расчет НДС несущей конструктивной системы для вариантов экстремальных сочетаний нагрузок;

- выявлены зоны локализации экстремальных напряжений и предложены мероприятия по усилению для обеспечения прочности и устойчивости конструкции;

- проведен анализ устойчивости, показавший, что действие экстремальных сочетаний нагрузок не приведет к потере устойчивости конструктивных элементов с коэффициентом запаса более 13;

- определены коэффициенты запаса прочности несущих конструктивных элементов, что позволило сформулировать рекомендации по дальнейшей оптимизации конструкции ВЭУ для эксплуатации в рассматриваемых условиях.

Сопоставление полученных результатов с данными литературных источников показало, что предлагаемая методика аэросервоупругого моделирования повышает точность расчета нагрузок и оценки НДС несущей конструктивной системы ВЭУ и дает возможность выявить зоны концентрации напряжений. В связи с принятым допущением об абсолютно жестком ММГ при назначении граничных условий закрепления свай важным вопросом остается учет изменяющейся жесткости многолетнемерзлого основания в условиях деградации и сезонного оттаивания-промерзания грунта, что требует дальнейшей доработки подходов. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании арктических ВЭУ класса S, а также при разработке методических рекомендаций по расчету ветроэнергетических установок.

Практическая значимость исследования заключается в разработке методики, позволяющей учитывать климатические факторы северных регионов при проектировании, что повышает надежность и эффективность конструкций ВЭУ, используемых в арктической зоне РФ.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Елистратов В.В.* Научно-техническое обоснование и проектирование энергокомплексов на основе ВИЭ для сложных природно-климатических условий // *Электричество*. 2023. № 10. С. 4–21. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-10-4-21. EDN RGZOCS.

2. *Zheng M., Yang Zh., Yang Sh., Still B.* Modeling and mitigation of excessive dynamic responses of wind turbines founded in warm permafrost // *Engineering Structures*. 2017. Vol. 148. Pp. 36–46. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.06.037

3. *Елистратов В.В., Ригель И.В.* Аэроупругое моделирование динамических нагрузок на несущие конструкции арктической ветроэнергетической установки // *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 2025. Т. 315. С. 78–94. EDN HQZJRD.

4. *Martini F., Contreras Montoya L.T., Ilinca A.* Review of Wind Turbine Icing Modelling Approaches //

*Energies*. 2021. Vol. 14. Issue 16. P. 5207. DOI: 10.3390/en14165207

5. *Jiang W., Wen R., Qin M., Zhao G., Ma L., Guo J. et al.* A Fast Simulation Method for Wind Turbine Blade Icing Integrating Physical Simulation and Statistical Analysis // *Energies*. 2024. Vol. 17. Issue 22. P. 5785. DOI: 10.3390/en17225785

6. *Tahani M., Hossein A., Hong J.* Simulation of unsteady ice accretion on horizontal axis wind turbine blade sections in turbulent wind shear condition // *Physics of Fluids*. 2024. Vol. 36. Issue 11. DOI: 10.1063/5.0227355

7. *Hu L., Zhu X., Hu C., Chen J., Du Z.* Wind Turbines Ice Distribution and Load Response under Icing Conditions // *Renewable Energy*. 2017. Vol. 113. Pp. 608–619. DOI: 10.1016/j.renene.2017.05.059

8. *Voinov I.B., Elistratov V.V., Keresten I.A., Konishchev M.A., Nikitin M.A., Sofronova D.I.* Profiling

a Wind Wheel Blade Using Parametric Optimization and Computational Aerodynamics Methods // *Thermal Engineering*. 2024. Vol. 71. Issue 6. Pp. 513–522. DOI: 10.1134/S0040601524060053

9. Демидов Д.А., Дубов А.Л. Моделирование и исследование аэродинамических процессов в области работы ветротурбины // *Вузовская наука в современных условиях* : сб. мат. 57-й науч.-техн. конф. Часть 1. 2023. С. 172–174. EDN KVMTVT.

10. Соломин Е.В., Терехин А.А., Мартьянов А.С., Ковалёв А.А., Исмаилов Д.Р., Рявкин Г.Н. и др. Оценка влияния моделей турбулентности на описание процессов вихреобразования в ветроэнергетике // *Вестник Самарского государственного технического университета*. Серия: Физико-математические науки. 2022. Т. 26. № 2. С. 339–354. DOI: 10.14498/vsgtu1885. EDN SVRJGF.

11. Елистратов В.В., Панфилов А.А., Петров С.Г. Использование цифровых технологий при обосновании энергетических и конструктивных параметров арктической ветроэнергетической установки // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. 2024. № 6 (270). С. 56–59. EDN VEMIVW.

12. Большев А.С., Фролов С.А., Харсеев А.Е., Розов И.О. Расчет прочности основания арктической ветроэнергетической установки при действии экстремальных внешних нагрузок // *Полярная механика* : сб. докл. VI Всеросс. науч.-практ. конф. с международ. участием. 2023. С. 87–97. DOI: 10.46960/polmech\_2023\_87. EDN PXIXHO.

13. Белостоцкий А.М., Негрозова И.Ю., Горячевский О.С. Оценка аэроупругой устойчивости шпиля башни // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 11. С. 1745–1762. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1745-1762

14. Belostotsky A., Afanasyeva I., Negrozova I., Goryachevsky O. Simulation of aerodynamic instability of building structures on the example of a bridge section. Part 2: solution of the problem in a coupled aeroelastic formulation and comparison with engineering estimates // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. Vol. 17. Issue 3. Pp. 24–38. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-3-24-38

15. Wang T., Zhong W., Qian Y., Zhu C. Wind Turbine Aerodynamic Performance Calculation. Springer, Singapore, 2023. DOI: 10.1007/978-981-99-3509-3

16. Anderson C.G. Wind Turbines: Theory and Practice. 2nd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2024.

17. Marten D. QBlade: A Modern Tool for the Aeroelastic Simulation of Wind Turbines : PhD Thesis. TU Berlin, 2020. DOI: 10.14279/depositonce-10646

18. Jonkman B., Platt A., Mudafort R., Branlard E., Sprague M., Ross H. et al. OpenFAST/openfast: v3.5.3 // Zenodo. 2024. DOI: 10.5281/zenodo.10962897

19. Brown K., Bortolotti P., Branlard E., Chetan M., Dana S., deVelder N. et al. One-to-one aeroservoelas-

tic validation of operational loads and performance of a 2.8 MW wind turbine model in OpenFAST // *Wind Energy Science*. 2024. Vol. 9. Issue 8. Pp. 1791–1810. DOI: 10.5194/wes-9-1791-2024

20. Papi F., Troise G., Behrens de Luna R., Saverin J., Perez-Becker S., Marten D. et al. Quantifying the impact of modeling fidelity on different substructure concepts. Part 2: Code-to-code comparison in realistic environmental conditions // *Wind Energy Science*. 2024. Vol. 9. Issue 4. Pp. 981–1004. DOI: 10.5194/wes-9-981-2024

21. Wu X., Zhang X., Bhattarai H.B., Hwang H.J., Yang J., Kang S. Structural Behavior Analysis of UHPC Hybrid Tower for 3-MW Super Tall Wind Turbine Under Rated Wind Load // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2022. Vol. 16. Issue 1. DOI: 10.1186/s40069-022-00542-8

22. Al-Sanad S., Parol J., Wang L., Kolios A. Design optimisation of wind turbine towers with reliability-based calibration of partial safety factors // *Energy Reports*. 2023. Vol. 9. Pp. 2548–2556. DOI: 10.1016/j.egy.2023.01.090

23. Partovi-Mehr N., Branlard E., Song M., Moaveni B., Hines E.M., Robertson A. Sensitivity Analysis of Modal Parameters of a Jacket Offshore Wind Turbine to Operational Conditions // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11. Issue 8. P. 1524. DOI: 10.3390/jmse11081524

24. Montgomerie B. Methods for Root Effects, Tip Effects and Extending the Angle of Attack Range to 180, With Application to Aerodynamics for Blades on Wind Turbines and Propellers. Technical Report, FOI, Swedish Defence Research Agency, 2004.

25. Øye S. Dynamic stall simulated as time lag of separation // *Proceedings of the 4th IEA Symposium on the Aerodynamics of Wind Turbines*. 1991. Vol. 27.

26. Klein A., Bartholomay S., Marten D., Lutz T., Pechlivanoglou G., Nayeri C. et al. About the suitability of different numerical methods to reproduce model wind turbine measurements in a wind tunnel with a high blockage ratio // *Wind Energy Science*. 2018. Vol. 3. Issue 1. Pp. 439–460. DOI: 10.5194/wes-3-439-2018

27. Snel H., Houwink R., Piers W. Sectional prediction of 3d effects for separated flow on rotating blades // *Proc. European Community Wind Energy Conference*. Lübeck – Travemünde, 1992.

28. Glauert H. Airplane Propellers // *Aerodynamic Theory*. 1935. Pp. 169–360. DOI: 10.1007/978-3-642-91487-4\_3

29. Lehtomäki V., Rissanen S., Wadham-Gagnon M., Sandel K., Moser W., Jacob D. Fatigue loads of iced turbines: Two case studies // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2016. Vol. 158. Pp. 37–50. DOI: 10.1016/J.JWEIA.2016.09.002

30. Yang Z., Still B.A., Wait I., Chen G. Dynamic Responses of a Wind Turbine Founded in Warm Permafrost // *Journal of Cold Regions Engineering*. 2018. Vol. 32. Issue 4. DOI: 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000169

Поступила в редакцию 28 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 8 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 5 мая 2025 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Иван Владимирович Ригель** — аспирант, инженер Научно-образовательного центра «Возобновляемые виды энергии и установки на их основе» Инженерно-строительного института; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29 литера Б; SPIN-код: 4858-7966, РИНЦ ID: 1237632, ResearcherID: NIS-9111-2025, ORCID: 0009-0003-0940-372X; ivan.rigel@yandex.ru;

**Виктор Васильевич Елистратов** — доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института, директор Научно-образовательного центра «Возобновляемые виды энергии и установки на их основе»; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д. 29, литера Б, SPIN-код: 2719-4658, РИНЦ ID: 36278, Scopus: 57189578726, ResearcherID: C-3627-2016, ORCID: 0000-0001-7051-6027; elistratov@spbstu.ru.

Вклад авторов:

Ригель И.В. — идея, сбор материала, расчетные исследования, написание статьи.

Елистратов В.В. — научное руководство, формирование структуры и методического наполнения статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Elistratov V.V. Engineering feasibility studies and designing of energy systems based on renewable energy sources for difficult natural and climatic conditions. *Electricity*. 2023; 10:4-21. DOI: 10.24160/0013-5380-2023-10-4-21. EDN RGZOCs. (rus.).
2. Zheng M., Yang Zh., Yang Sh., Still B. Modeling and mitigation of excessive dynamic responses of wind turbines founded in warm permafrost. *Engineering Structures*. 2017; 148:36-46. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.06.037
3. Elistratov V.V., Rigel I.V. Aeroelastic modeling of dynamic loads on the arctic wind turbine supporting structures. *Proceedings of the VNIIG*. 2025; 315:78-94. EDN HQZJRD. (rus.).
4. Martini F., Contreras Montoya L.T., Ilinca A. Review of Wind Turbine Icing Modelling Approaches. *Energies*. 2021; 14(16):5207. DOI: 10.3390/en14165207
5. Jiang W., Wen R., Qin M., Zhao G., Ma L., Guo J. et al. A Fast Simulation Method for Wind Turbine Blade Icing Integrating Physical Simulation and Statistical Analysis. *Energies*. 2024; 17(22):5785. DOI: 10.3390/en17225785
6. Tahani M., Hossein A., Hong J. Simulation of unsteady ice accretion on horizontal axis wind turbine blade sections in turbulent wind shear condition. *Physics of Fluids*. 2024; 36(11). DOI: 10.1063/5.0227355
7. Hu L., Zhu X., Hu C., Chen J., Du Z. Wind Turbines Ice Distribution and Load Response under Icing Conditions. *Renewable Energy*. 2017; 113:608-619. DOI: 10.1016/j.renene.2017.05.059
8. Voinov I.B., Elistratov V.V., Keresten I.A., Konishchev M.A., Nikitin M.A., Sofronova D.I. Profiling a Wind Wheel Blade Using Parametric Optimization and Computational Aerodynamics Methods. *Thermal Engineering*. 2024; 71(6):513-522. DOI: 10.1134/S0040601524060053
9. Demidov D.A., Dubov A.L. Modeling and research of aerodynamic processes in the area of wind turbine operation. *University science in modern conditions : Proceedings of the 57th scientific and technical conference. Part I*. 2023; 172-174. EDN KVMTVT. (rus.).
10. Solomin E.V., Terekhin A.A., Martyanov A.S., Kovalyov A.A., Ismagilov D.R., Ryavkin G.N. et al. Evaluation of influence of turbulence models on the vortex formation processes modeling in wind power. *Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences*. 2022; 26(2):339-354. DOI: 10.14498/vsgtu1885. EDN SVRJGF. (rus.).
11. Elistratov V.V., Panfilov A.A., Petrov S.G. The use of digital technologies in substantiating the energy and design parameters of the arctic wind power plant. *Plumbing, Heating, Air-conditioning*. 2024; 6(270):56-59. EDN VEMIVW. (rus.).
12. Bol'shev A.S., Frolov S.A., Kharseev A.E., Rozov I.O. Calculation of the strength of the foundation of an Arctic wind turbine under extreme external loads. *Polar Mechanics : Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation*. 2023; 87-97. DOI: 10.46960/polmech\_2023\_87. EDN PXIXHO. (rus.).
13. Belostotsky A.M., Negrozova I.Yu., Goryachevsky O.S. Estimation of aeroelastic stability of a tower spire. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(11):1745-1762. DOI: 10.22227/19970935.2023.11.1745-1762 (rus.).
14. Belostotsky A., Afanasyeva I., Negrozova I., Goryachevsky O. Simulation of aerodynamic instability of building structures on the example of a bridge

section. Part 2: solution of the problem in a coupled aeroelastic formulation and comparison with engineering estimates. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(3):24-38. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-3-24-38

15. Wang T., Zhong W., Qian Y., Zhu C. *Wind Turbine Aerodynamic Performance Calculation*. Springer, Singapore, 2023. DOI: 10.1007/978-981-99-3509-3

16. Anderson C.G. *Wind Turbines: Theory and Practice*. 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 2024.

17. Marten D. *QBlade: A Modern Tool for the Aeroelastic Simulation of Wind Turbines : PhD Thesis*. TU Berlin, 2020. DOI: 10.14279/depositonce-10646

18. Jonkman B., Platt A., Mudafort R., Branlard E., Sprague M., Ross H. et al. OpenFAST/openfast: v3.5.3. *Zenodo*. 2024. DOI: 10.5281/zenodo.10962897

19. Brown K., Bortolotti P., Branlard E., Chetan M., Dana S., deVelder N. et al. One-to-one aeroservoelastic validation of operational loads and performance of a 2.8 MW wind turbine model in OpenFAST. *Wind Energy Science*. 2024; 9(8):1791-1810. DOI: 10.5194/wes-9-1791-2024

20. Papi F., Troise G., Behrens de Luna R., Saverin J., Perez-Becker S., Marten D. et al. Quantifying the impact of modeling fidelity on different substructure concepts. Part 2: Code-to-code comparison in realistic environmental conditions. *Wind Energy Science*. 2024; 9(4):981-1004. DOI: 10.5194/wes-9-981-2024

21. Wu X., Zhang X., Bhattarai H.B., Hwang H.J., Yang J., Kang S. Structural Behavior Analysis of UHPC Hybrid Tower for 3-MW Super Tall Wind Turbine Under Rated Wind Load. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2022; 16(1). DOI: 10.1186/s40069-022-00542-8

22. Al-Sanad S., Parol J., Wang L., Kolios A. Design optimisation of wind turbine towers with reliability-based calibration of partial safety factors.

*Energy Reports*. 2023; 9:2548-2556. DOI: 10.1016/j.egy.2023.01.090

23. Partovi-Mehr N., Branlard E., Song M., Moaveni B., Hines E.M., Robertson A. Sensitivity Analysis of Modal Parameters of a Jacket Offshore Wind Turbine to Operational Conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023; 11(8):1524. DOI: 10.3390/jmse11081524

24. Montgomerie B. *Methods for Root Effects, Tip Effects and Extending the Angle of Attack Range to 180, With Application to Aerodynamics for Blades on Wind Turbines and Propellers*. Technical Report, FOI, Swedish Defence Research Agency, 2004.

25. Øye S. Dynamic stall simulated as time lag of separation. *Proceedings of the 4th IEA Symposium on the Aerodynamics of Wind Turbines*. 1991; 27.

26. Klein A., Bartholomay S., Marten D., Lutz T., Pechlivanoglou G., Nayeri C. et al. About the suitability of different numerical methods to reproduce model wind turbine measurements in a wind tunnel with a high blockage ratio. *Wind Energy Science*. 2018; 3(1):439-460. DOI: 10.5194/wes-3-439-2018

27. Snel H., Houwink R., Piers W. Sectional prediction of 3d effects for separated flow on rotating blades. *Proc. European Community Wind Energy Conference*. Lübeck – Travemünde, 1992.

28. Glauert H. Airplane Propellers. *Aerodynamic Theory*. 1935; 169-360. DOI: 10.1007/978-3-642-91487-4\_3

29. Lehtomäki V., Rissanen S., Wadham-Gagnon M., Sandel K., Moser W., Jacob D. Fatigue loads of iced turbines: Two case studies. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2016; 158:37-50. DOI: 10.1016/J.JWEIA.2016.09.002

30. Yang Z., Still B.A., Wait I., Chen G. Dynamic Responses of a Wind Turbine Founded in Warm Permafrost. *Journal of Cold Regions Engineering*. 2018; 32(4). DOI: 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000169

Received February 28, 2025.

Adopted in revised form on April 8, 2025.

Approved for publication on May 5, 2025.

**B I O N O T E S :** **Ivan V. Rigel** — postgraduate student, engineer of the Scientific and Educational Center “Renewable Energy Sources and Installations Based on Them” of the Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29B Polytechnicheskaya st., vn. ter. d., Akademicheskoye municipal district, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 4858-7966, ID RSCI: 1237632, ResearcherID: NIS-9111-2025, ORCID: 0009-0003-0940-372X; ivan.rigel@yandex.ru;

**Viktor V. Elistratov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Higher School of Hydrotechnical and Power Engineering Construction of the Institute of Civil Engineering, Director of the Scientific and Educational Center “Renewable Energy Sources and Installations Based on Them”; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29B Polytechnicheskaya st., n. ter. d., Akademicheskoye municipal district, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 2719-4658, ID RSCI: 36278, Scopus: 57189578726, ResearcherID: C-3627-2016, ORCID: 0000-0001-7051-6027; elistratov@spbstu.ru.

*Contribution of the authors:*

*Ivan V. Rigel* — idea, collection of material, computational research, writing the article.

*Viktor V. Elistratov* — scientific supervision, formation of the structure and methodological filling of the article.

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.014

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1051-1060

## Оценка жесткости баз внецентренно нагруженных стальных колонн по EN 1993-1-8

Андрей Брониславович Шурин, Игорь Владимирович Зинкевич

Брестский государственный технический университет (БрГТУ); г. Брест, Республика Беларусь

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Практика проектирования металлоконструкций показывает, что действительная работа конструкций узловых сопряжений практически никогда не является «чистым» шарниром и не существует «абсолютно жесткого» соединения элементов. В EN 1993-1-8 узлы металлических конструкций классифицируются как жесткие, номинально-шарнирные и полужесткие в зависимости от соотношения начальной вращательной жесткости узла и редуцируемой погонной жесткости. Актуальность исследования заключается в уточнении критериев отнесения баз внецентренно сжатых колонн к жестким, что позволит использовать методику EN 1993-1-8 в отечественной практике проектирования.

**Материалы и методы.** Применен сравнительный анализ типовых решений баз внецентренно сжатых колонн и произведена оценка их жесткости по EN 1993-1-8. Выполнен анализ влияния податливости баз внецентренно сжатых колонн одноэтажных промышленных зданий со смещаемой рамой на расчетную длину колонны и коэффициент снижения расчетного сопротивления (прочности) по пределу текучести.

**Результаты.** Приведена классификация узлов стальных конструкций с точки зрения конструктивной работы в соответствии с отечественной практикой проектирования стальных конструкций, базирующейся на СНиП II-23 (СП 16.13330). Представлены отличия в классификации узлов в зависимости от их вращательной жесткости по EN 1993-1-8. Проведена оценка жесткости баз типовых колонн и разработаны рекомендации по изменению критерия их классификации.

**Выводы.** Выполнена оценка жесткости типовых внецентренно нагруженных баз колонн. Установлено, что более 50 % типовых баз колонн попадают в разряд полужестких, что в соответствии с требованиями EN 1993-1-8 недопустимо. На жесткость баз колонн толщина плиты и класс прочности бетона фундамента влияют в меньшей степени. Жесткость на 60 % зависит от марки (класса) стали и диаметра анкерных болтов и высоты колонны. На основании этого рекомендуется пересмотр конструктивных решений, принятых в типовых решениях, или критериев отнесения типа базы колонны к жесткой.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Еврокод, внецентренно сжатые колонны, шарнирный узел, полужесткий узел, жесткий узел, база колонны, вращательная жесткость, угол поворота узла, анкерный болт

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Шурин А.Б., Зинкевич И.В. Оценка жесткости баз внецентренно нагруженных стальных колонн по EN 1993-1-8 // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 1051–1060. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1051-1060

Автор, ответственный за переписку: Андрей Брониславович Шурин, shuryrn@mail.ru.

## Stiffness assessment of bases of off-centre loaded steel columns according to EN 1993-1-8

Andrei B. Shuryrn, Igor V. Zinkevich

Brest State Technical University (BrSTU); Brest, Republic of Belarus

### ABSTRACT

**Introduction.** The practice of metal structure design shows that the actual performance of nodal joint structures is almost never a “pure” hinge, and there is no “absolutely rigid” connection of elements. In EN 1993-1-8, metal structure assemblies are classified as rigid, nominally hinged and semi-rigid depending on the ratio of the initial rotational stiffness of the assembly to the reduced linear stiffness. The relevance of this study lies in the clarification of the criteria for classifying the bases of off-centre compressed columns as rigid, which will allow the EN 1993-1-8 methodology to be used in domestic design practice.

**Materials and methods.** The study uses comparative analysis of typical solutions for the bases of off-centre compressed columns and assesses their stiffness according to EN 1993-1-8. An analysis of the influence of the pliability of the bases of off-centre compressed columns of single-storey industrial buildings with a sway frames on the design length of the column and the yield strength reduction factor has been performed.

**Results.** Classification of steel structure assemblies from the point of view of structural performance is given, in accordance with the domestic practice of steel structure design based on SNiP II-23 (SP 16.13330). Differences in the classification of assemblies depending on their rotational stiffness according to EN 1993-1-8 are presented. The stiffness of bases of typical columns is evaluated and recommendations for changing the criterion of their classification are developed.

**Conclusions.** The stiffness of typical off-centre loaded column bases was assessed. It was found that more than 50 per cent of typical column bases are semi-rigid, which is unacceptable according to EN 1993-1-8. The stiffness of the column bases is less affected by the thickness of the slab and the strength class of the foundation concrete. The stiffness is 60 % dependent on the steel grade and diameter of the anchor bolts and the height of the column. Based on this, it is recommended to revise the design solutions adopted in the standard solutions or the criteria for classifying the column base type as rigid.

**KEYWORDS:** Eurocode, off-centre loaded columns, nominally pinned joint, semi rigid joint, rigid joint, base of column, rotational stiffness, rotation of a joint, anchor bolt

**FOR CITATION:** Shuryin A.B., Zinkevich I.V. Stiffness assessment of bases of off-centre loaded steel columns according to EN 1993-1-8. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):1051-1060. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1051-1060 (rus.).

*Corresponding author:* Andrei B. Shuryin, shuryin@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Практика проектирования металлоконструкций показывает, что действительная работа конструкций узловых сопряжений практически никогда не является «чистым» шарниром и не существует «абсолютно жесткого» соединения элементов. Реальная работа всех узлов в той или иной степени полужесткая, податливая, так как не учитываются трение элементов, их размеры, вращательная жесткость и другие факторы. В EN 1993-1-8<sup>1</sup> узлы металлических конструкций классифицируются как жесткие, номинально-шарнирные и полужесткие в зависимости от соотношения начальной вращательной жесткости узла и редуцируемой погонной жесткости.

Цель исследования — оценка жесткости внецентренно сжатых баз стальных колонн из широкополочных двутавров, запроектированных в соответствии с требованиями СНиП II-23 по шифру 8397 для одноэтажных зданий с покрытием типа «Молодечно»<sup>2</sup>. Актуальность данного исследования заключается в уточнении критериев отнесения баз внецентренно сжатых колонн к жестким, что позволит использовать методику EN 1993-1-8 в отечественной практике проектирования.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании применен сравнительный анализ типовых решений баз внецентренно сжатых колонн и произведена оценка их жесткости по EN 1993-1-8.

Еврокоды (Eurocode) — комплект гармонизированных стандартов для расчета несущих строительных конструкций, разработанных техническим комитетом CEN/TC 250 и устанавливающих единые подходы к проектированию несущих строительных конструкций. Проектированию стальных конструкций посвящена часть EN 1993-1, которая содержит двенадцать подчастей, EN 1993-1-1–EN 1993-1-12, каждая из которых касается конкретных аспектов проектирования стальных элементов, предельных состояний или материалов. Настоящая статья продолжает цикл исследований, посвященных опыту использования европейских нормативных документов при проектировании стальных конструкций [1–3].

Результаты сравнительного анализа систематизированы и схематизированы в графическом и табличном виде. Выполнен анализ влияния податливости баз внецентренно сжатых колонн одноэтажных промышленных зданий со смещаемой рамой на расчетную длину колонны и коэффициент снижения расчетного сопротивления (прочности) по пределу текучести.

С точки зрения конструктивной работы в соответствии с отечественной практикой проектирования стальных конструкций, базирующейся на СНиП II-23 (СП 16.13330)<sup>3</sup>, узлы стальных конструкций классифицируются на жесткие и шарнирные.

Жесткие узлы стальных конструкций образуют рамную систему, способную воспринимать и передавать изгибающий момент между элементами, которые сходятся в узле, не допуская взаимного поворота в защемлении. Такое примыкание придает жесткость всему каркасу здания, позволяя избежать или уменьшить постановку невыгодных с архитектурной точки зрения связей. Кроме того, жесткие узлы дают возможность не только снизить изгибающие моменты в пролете элементов металлоконструкций, но и их прогибы. Но конструирование жестких узлов накладывает повышенные требования к заводским и монтажным сварным швам, качеству высокопрочных болтов и к химическому составу стали, что существенно увеличивает стоимость металлоконструкций. К жестким узлам относятся равнопрочные сварные соединения металлопроката, фланцевые и фрикционные на высокопрочных болтах.

Шарнирные узлы обеспечивают передачу только продольных и поперечных усилий, избегая изгибающих моментов. При этом в шарнирных узлах допускается поворот между примыкающими элементами. К шарнирным узлам относятся примыкания балок на болтах класса точности В, опирание через опорное ребро и т.д. (рис. 1). Шарнирные узлы — наименее дорогостоящие вследствие пониженных требований к точности и качеству изготовления и монтажа. При шарнирной схеме примыкания элементов жесткость каркаса должна быть

<sup>1</sup> ТКП EN 1993-1-8 (EN 1993-1-8:2005, IDT). Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1–8. Расчет соединений. 2020. 128 с.

<sup>2</sup> Типовые конструкции, изделия и узлы зданий и сооружений. Шифр 8397 «Стальные колонны из широкополочных двутавров и связи из гнutosварных профилей для одноэтажных зданий с покрытием типа «Молодечно». Вып. 2. Конструкции для зданий высотой до низа ферм бескрановых 6,0, 7,2, 8,4 м; с мостовыми кранами — 8,4, 9,6, 10,8 м. Чертежи КМ. ГПИ Ленпроектстальконструкция.

<sup>3</sup> СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81\*. 2017. 140 с.

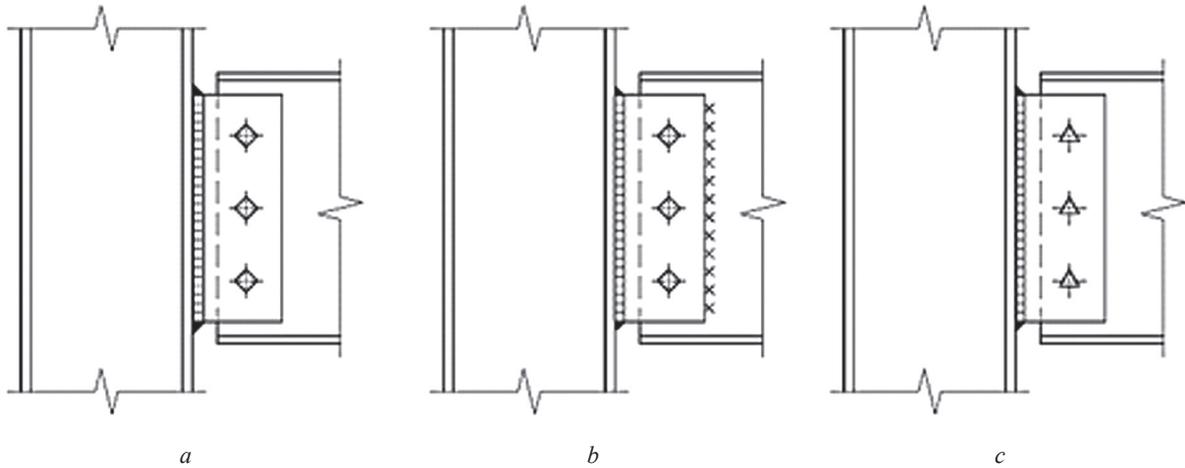


Рис. 1. Узловые соединения металлоконструкций, относящиеся к шарнирным по СНИП II-23  
 Fig. 1. Nodal joints of metal structures related to nominally pinned to SNiP II-23

обеспечена постановкой связей, ядер жесткости и т.д.

Практика проектирования металлоконструкций показывает, что действительная работа конструкций узловых сопряжений практически никогда не является «чистым» шарниром и не существует «абсолютно жесткого» соединения элементов. Реальная работа всех узлов в той или иной степени полужесткая, податливая, поскольку не учитываются трение элементов, их размеры, вращательная жесткость и другие факторы [4–7].

В соответствии с требованиями п. 5.2.2.5(1) EN 1993-1-8 узлы металлических конструкций классифицируются как жесткие, номинально-шарнирные и полужесткие в зависимости от соотношения начальной вращательной жесткости узла  $S_{j,ini}$  и редуцируемой погонной жесткости  $k_b \cdot E \cdot J_b / L_b$ , где  $J_b$  — момент инерции поперечного сечения балки в плоскости действия момента;  $J_c$  — момент инерции поперечного сечения колонны в плоскости действия момента;  $L_b$  — пролет балки (расстояние между центрами колонн);  $L_c$  — высота колонны в пределах рассматриваемого этажа;  $i_b$  — среднее значение погонной жесткости  $J_b / L_b$  для всех балок данного этажа;  $i_c$  — среднее значение погонной жесткости  $J_c / L_c$  для всех колонн данного этажа;  $k_b$  — коэффициент, принимаемый для номинально-шарнирных узлов  $k_b = 0,5$  (зона 3, рис. 2). Для жестких узлов в каркасах зданий с системой, уменьшающих горизонтальные перемещения не менее чем на 80 %,  $k_b = 8$ , для свободных рам при отношении  $\frac{i_b}{i_c} \geq 0,1$  коэффициент  $k_b = 25$  (зона 1, рис. 2). При отношении  $\frac{i_b}{i_c} < 0,1$  узлы свободных рам следует классифицировать как полужесткие (зона 2, рис. 2).

Поэтому при классификации узлы металлических конструкций, приведенные на рис. 1, b, c,

с большей долей вероятности будут отнесены к ряду полужестких, что потребует внесения корректировки жесткостных характеристик узлов в расчетной схеме.

В соответствии с отечественной практикой проектирования к типовым жестким сопряжениям колонн с фундаментами относятся конструктивные решения баз (рис. 3).

Исследования в области классификации баз колонн в Европе были проведены в 90-х гг. XX в. и представлены в публикациях [8, 9]. Разработанные критерии классификации жесткости<sup>4,5</sup> [10–13] включены в комплект европейских нормативных документов по проектированию стальных конструкций (EN 1993-1-8). В основе классификации лежит 5%-ный критерий, когда базы считаются жесткими, если их фактическое поведение при вращении не влияет на сопротивление рамы в предельном состоянии бо-

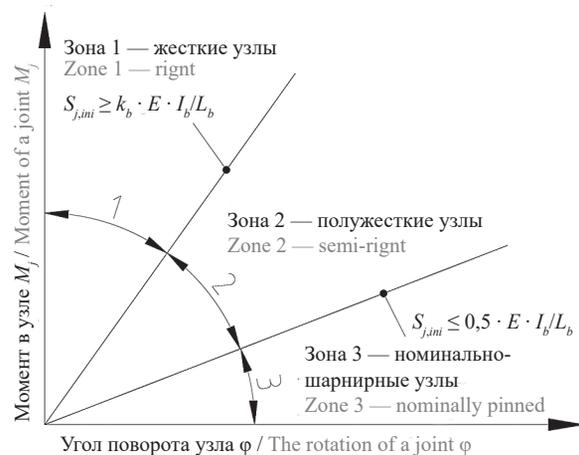


Рис. 2. Границы классификационных зон для узлов, кроме сопряжений баз колонн с фундаментами

Fig. 2. Classification boundaries for joints other than column bases are given

<sup>4</sup>NCCI: Column base stiffness for global analysis SN045a-EN-EU. 9 p.

<sup>5</sup>Steel buildings in Europe. Multi-Storey Steel Buildings. Part 5:Joint Design. 108 p.

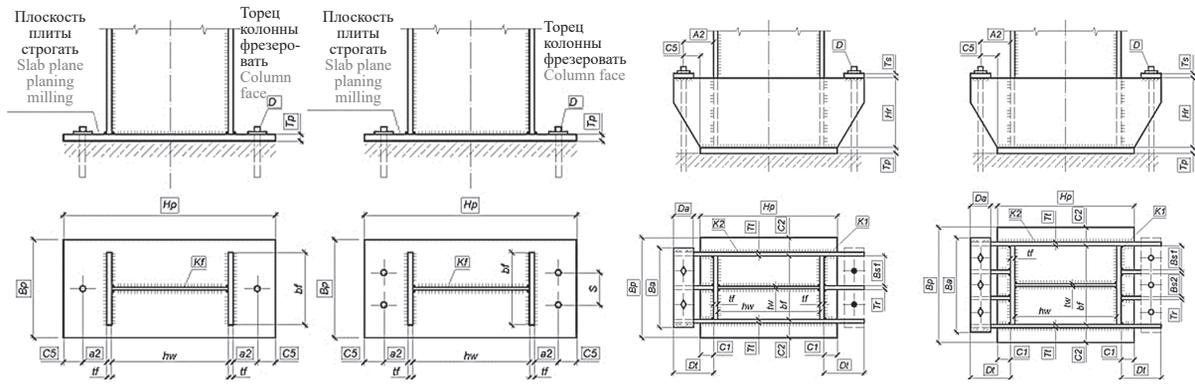
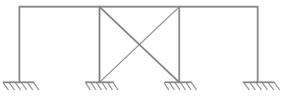


Рис. 3. Типовые решения жестких баз колонн при конструировании по СНиП II-23

Fig. 3. Typical solutions for rigid column bases during construction to SNiP II-23

Табл. 1. Начальная вращательная жесткость баз колонн

Table 1. The initial rotational stiffness of base of column

<p>Рамы с системой связей, уменьшающих горизонтальные перемещения не менее чем на 80 %, и влиянием деформаций которых допускается пренебречь</p> <p>For frames where the bracing system reduces the horizontal displacement by at least 80 % and the influence of deformations of which can be neglected</p>		<p>Свободные (сдвигаемые) рамы</p> <p>Sway frames</p> 	
<p>если <math>\bar{\lambda}_0 \leq 0,5</math></p> <p>if <math>\bar{\lambda}_0 \leq 0.5</math></p>	<p>если <math>0,5 &lt; \bar{\lambda}_0 &lt; 3,93</math> и</p> <p><math>S_{j,ini} \geq 7(2 \cdot \bar{\lambda}_0 - 1) \cdot E \cdot J_c / L_c</math> (1)</p> <p>if <math>0.5 &lt; \bar{\lambda}_0 &lt; 3.93</math> and</p> <p><math>S_{j,ini} \geq 7(2 \cdot \bar{\lambda}_0 - 1) \cdot E \cdot J_c / L_c</math> (1)</p>	<p>если <math>\bar{\lambda}_0 \geq 0,5</math> и</p> <p><math>S_{j,ini} \geq 48 \cdot E \cdot J_c / L_c</math> (2)</p> <p>if <math>\bar{\lambda}_0 \geq 0.5</math> and</p> <p><math>S_{j,ini} \geq 48 \cdot E \cdot J_c / L_c</math> (2)</p>	<p><math>S_{j,ini} \geq 30 \cdot E \cdot J_c / L_c</math> (3)</p>

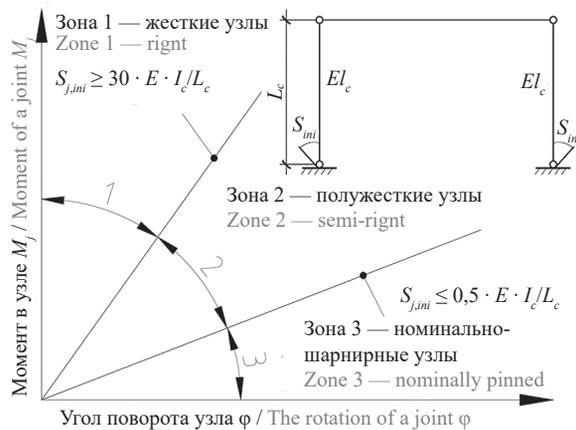


Рис. 4. Границы классификационных зон баз колонн с фундаментами для свободных рам

Fig. 4. Classification boundaries for joints column bases for sway frames

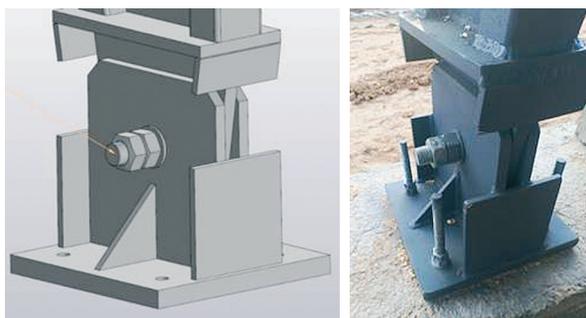


Рис. 5. Номинально-шарнирная база колонны (со штифтовым соединением)

Fig. 5. Nominally pinned column base (with pin connection)

лее чем на 5 % и не влияет на горизонтальные перемещения при эксплуатационных нагрузках более чем на 10 % [12]. Согласно требованиям п. 5.2.2.5(2) EN 1993-1-8 базы колонн относятся к жестким, если выполняются условия табл. 1 (рис. 4).

Условия, позволяющие классифицировать базы колонны как шарнирные, определяются аналогично. Однако лишь немногие конструктивные решения баз колонн могут обладать низкой начальной вращательной жесткостью  $S_{j,ini}$ , достаточной для того, чтобы быть классифицированными как шарнирные. Шарнирная база колонны должна быть способна передавать внутренние усилия без создания значительных моментов, которые могли бы отрицательно сказаться на колоннах или конструкции каркаса в целом. База колонны также должна обладать достаточной способностью к вращению при расчетных нагрузках. На практике к номинально-шарнирным опорам могут относиться штифтовые (рис. 5), сферические и катковые опоры.

Полужесткие базы колонн — это те, которые не соответствуют критериям отнесения к категории жестких или номинально-шарнирных. Однако, принимая во внимание предыдущие соображения о соединениях со штифтами, большинство сопряжений баз колонн с фундаментами, которые не являются жесткими, будут относиться к полужестким [14].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценку жесткости типовых баз внецентренно сжатых колонн выполнили для шифра 8397 «Сталь-

ные колонны из широкополочных двутавров и связи из гнутосварных профилей для одноэтажных зданий с покрытием типа “Молодечно”, выпуск 2, для колонн высотой<sup>2</sup> 6,0; 7,2; 8,4 и 9,6 м. Конструктивное решение типовой базы колонны<sup>2</sup> приведено на рис. 6.

Расчет выполняем на предельные значения изгибающих моментов и осевых сил. Начальную вращательную жесткость  $S_{j,ini}$  базы колонны, подверженной совместному действию осевой силы и изгибающего момента, определяем по формуле:

$$S_{j,ini} = \frac{E \cdot z^2}{1/k_T + 1/k_C} \cdot \frac{e}{e - e_k}, \quad (4)$$

где

$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} \text{ — эксцентриситет в узле;}$$

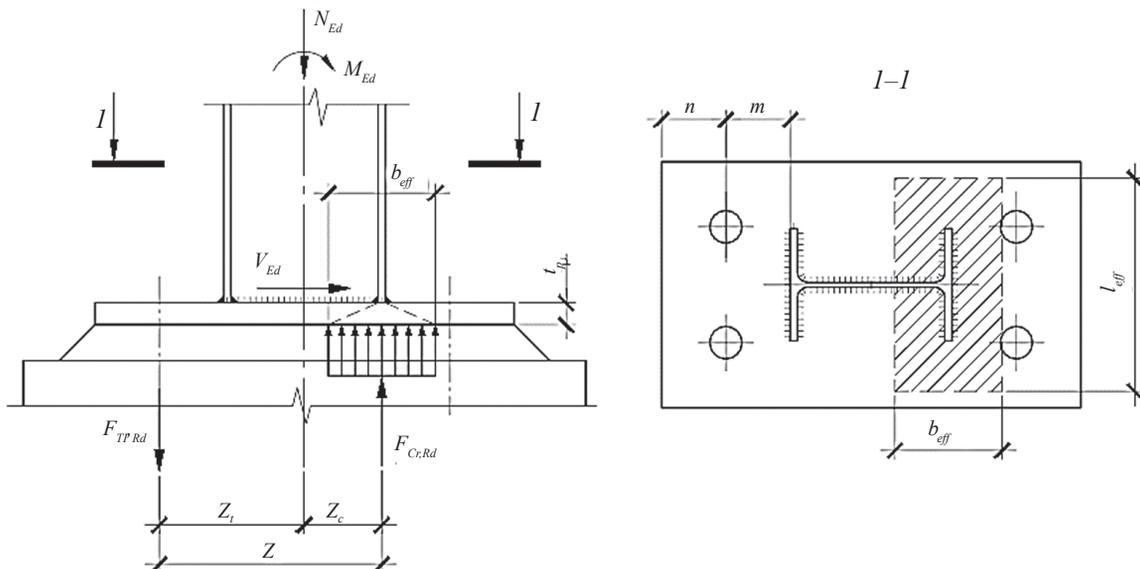
$$k_T = \frac{1}{\frac{1}{2k_{15}} + \frac{1}{2k_{16}}} \text{ — эффективный коэффициент жесткости растянутой зоны;}$$

$$e_k = \frac{z_c \cdot k_c - z_c \cdot k_T}{k_T + k_C} \text{ — рис. 7.}$$

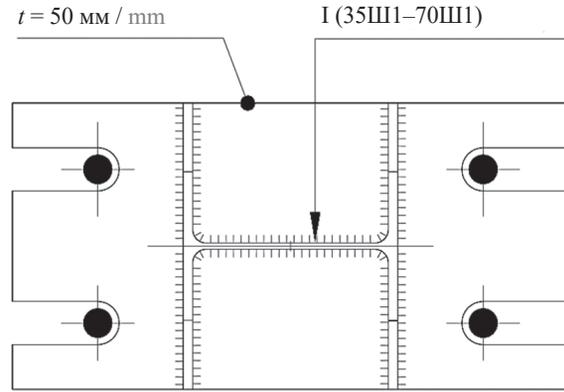
Коэффициенты жесткости в формуле (4) принимаем по табл. 2.

При расчете по EN 1993-1-8 вводим предположку, что опорная плита колонны «абсолютно жесткая», так как в отличие от типового решения (рис. 6) подкреплена дополнительными ребрами и траверсами, уменьшающими изгибающий момент в плите, а приваренные анкерные плитки уменьшают ее прогиб (рис. 7). Тогда коэффициент жесткости, учитывающий изгиб плиты в растянутой зоне фундамента  $k_{15}$ , можно принять равным бесконечности:  $k_{15} = \infty$  (рис. 8).

Поверочные расчеты сводим в табл. 3.



**Рис. 7.** К расчету базы внецентренно сжатой колонны  
**Fig. 7.** Calculation of the base of an off-centre compressed column



**Рис. 6.** Конструктивное решение типовой базы колонны по шифру 8397<sup>2</sup>

**Fig. 6.** Design solution of a typical column base according to code 8397<sup>2</sup>

На основании выполненных расчетов по оценке жесткости типовых баз колонн по шифру 8397<sup>2</sup> установлено, что к жестким относятся 42 % типовых решений (только для колонн с высотой 8,4 и 9,6 м). Остальные базы (более 50 %) попадают в разряд полужестких. Для отнесения их к жестким требуется существенное увеличение диаметра анкерных болтов или введение предпосылки абсолютно жесткой плиты. Увеличение толщины плиты не приводит к существенному повышению жесткости, что косвенно подтверждается в труде [15].

Таким образом, вызывает интерес, принятый в EN 1993-1-8 критерий оценки жесткости баз колонн свободных рам. Анализ ряда литературных источников показывает, что таким критерием может быть принято уменьшение упругой критической силы колонны более чем на 5 % [12, 16, 17]. При обычном, поэлементном расчете колонн используются инструменты снижения расчетного сопротив-

Табл. 2. Коэффициенты жесткости для баз колонн

Table 2. Stiffness coefficients for column bases

Компонент Component	Коэффициент жесткости $k_i$ Stiffness coefficient $k_i$	
Бетон фундамента, включая стяжку или подливку под опорной плитой базы колонны Concrete in compression (including grout)	$k_C = k_{13} = \frac{E_c \cdot \sqrt{b_{eff} \cdot l_{eff}}}{1,275 \cdot E}$ <p>где <math>E_c</math> — модуль упругости бетона фундамента; <math>b_{eff}</math> и <math>l_{eff}</math> — эффективная ширина и длина полки Т-образного элемента (рис. 7) where <math>E_c</math> — modulus of elasticity of foundation concrete; <math>b_{eff}</math> and <math>l_{eff}</math> — is the effective width and length of the T-stub flange (Fig. 7)</p>	
Изгиб плиты базы колонны в растянутой зоне фундамента Base plate in bending under tension	С учетом усилий от эффекта рычага* With prying forces*	Без учета усилий от эффекта рычага* Without prying forces*
	$k_{15} = \frac{0,85 \cdot l_{eff} \cdot t_p^3}{2 \cdot m^3}$	$k_{15} = \frac{0,425 \cdot l_{eff} \cdot t_p^3}{2 \cdot m^3}$
где $t_p$ — толщина опорной плиты базы колонны; $m$ — принимать по рис. 7 where $t_p$ — column base plate thickness; $m$ — Fig. 7		
Растяжение анкерных болтов Anchor bolts in tension	С учетом усилий от эффекта рычага* With prying forces*	Без учета усилий от эффекта рычага* Without prying forces*
	$k_{16} = \frac{1,6 \cdot A_s}{L_b}$	$k_{16} = \frac{2,0 \cdot A_s}{L_b}$
где $A_s$ — площадь растянутого болта или стержня анкерного болта; $L_b$ — длина деформирования болта, равная зажимной длине (суммарная толщина стягиваемых элементов и шайб) плюс полусумма высоты головки болта и гайки, или длина деформирования фундаментного болта, равная сумме восьми номинальных диаметров болта, толщины слоя стяжки (подливки), толщины опорной плиты, шайбы и половины высоты гайки (подливки), толщины опорной плиты, шайбы и половины высоты гайки where $A_s$ — the tensile stress area of the bolt or of the anchor bolt; $L_b$ — the bolt elongation length, taken equal to the grip length (total thickness of material and washers), plus half the sum of the height of the bolt head and the height of the nut or the anchor bolt elongation length, taken equal 10 the sum of 8 times the nominal bolt diameter, the grout layer, the plate thickness, the washer and half the height of the nut		

Примечание: \* — усилия от эффекта рычага могут возникнуть, если  $L_b \leq \frac{8,8 \cdot m^3 \cdot A_s}{l_{eff} \cdot t_p}$ .  
Note: \* — prying forces may develop, if  $L_b \leq \frac{8,8 \cdot m^3 \cdot A_s}{l_{eff} \cdot t_p}$ .

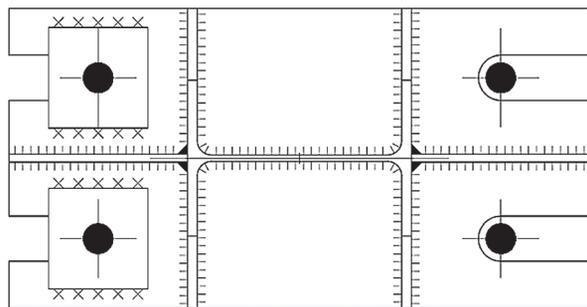


Рис. 8. Конструктивное решение базы колонны, принятой в расчете

Fig. 8. Design solution of the column base accepted in the calculation

ления и приведенных длин. Коэффициент приведения длины определяется по известной формуле:

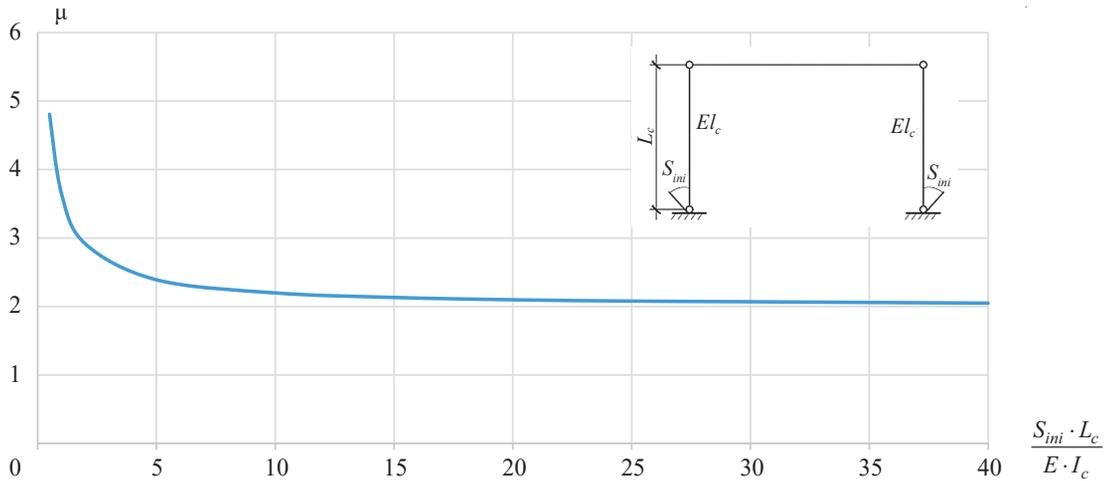
$$\mu = \sqrt{\frac{N_e}{N_{cr,e}}}$$

где  $N_e = \frac{\pi^2 E \cdot I_c}{L^2}$  — критическая сила Эйлера. Критическая сила в упругой стадии с учетом упругой заделки базы колонны  $N_{cr,e}$  может быть определена расчетом на устойчивость рамы с применением программных комплексов, например RFEM, Lira и т.д.

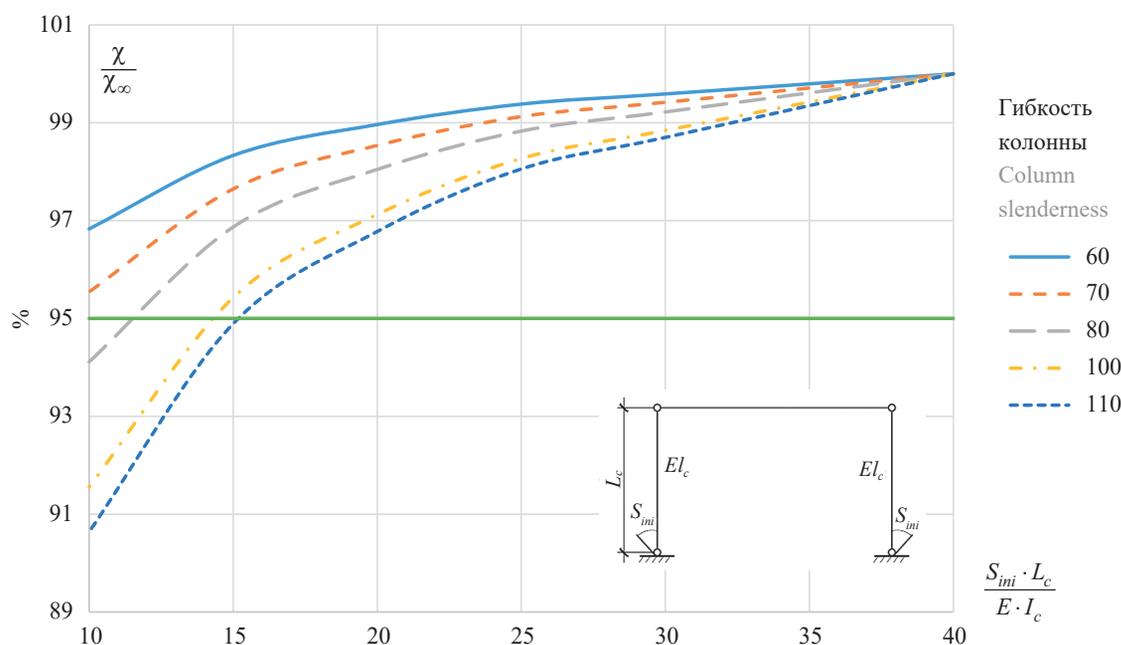
На рис. 9 приведен график изменения коэффициента приведения длины  $\mu$  в зависимости от отношения:  $\frac{S_{inj} \cdot L_c}{E \cdot I_c}$ , из которого следует, что при относительных жесткостях базы колонны до 25–30 зна-

**Табл. 3.** Оценка жесткости типовых баз колонн по шифру 8397 выпуск 2<sup>2</sup>  
**Table 3.** Estimation of stiffness of typical column bases according to code 8397 issue 2<sup>2</sup>

Номер двутавра Number I-beam	Высота колонны $L_c$ , м Column height $L_c$ , м	Начальная вращательная жесткость базы $S_{j,ini}$ , кН·м The initial rotational stiffness of base $S_{j,ini}$ , кН·м	Погонная жесткость колонны $S_k = E \cdot J_c / L_c$ , кН·м Linear stiffness of column $S_k = E \cdot J_c / L_c$ , кН·м	Требуемый диаметр анкерных болтов, мм Required diameter of anchor bolts, mm		Коэффициент $k_b = \frac{S_{j,ini}}{S_j}$ Coefficient $k_b = \frac{S_{j,ini}}{S_j}$
				по шифру 8397 code 8397	по EN 1993-1-8 (при $k_{15} = \infty$ ) in EN 1993-1-8 (at $k_{15} = \infty$ )	
35Ш1	6,0	121 056,8	6926,5	42	56	17,5
	7,2	222 179,6	5772,083	42	56	<b>38,5</b>
	8,4	214 918,3	4947,5	42	30	<b>43,4</b>
40Ш1	6,0	290 145,2	12 026	42	64	24,1
	7,2	283 096,3	10 021,67	42	48	28,2
	8,4	297 978,2	8390,233	48	48	<b>35,5</b>
	9,6	322 943,3	7516,25	48	36	<b>43,0</b>
50Ш1	6,0	434 805,1	21 325,5	48	90	20,4
	7,2	425 495,1	17 771,25	56	72	23,9
	8,4	489 683,7	15 232,5	56	56	<b>32,1</b>
	9,6	472 311,6	13 328,44	64	48	<b>35,4</b>
60Ш1	7,2	653 151,5	31 295,83	56	110	20,9
	8,4	669 772,6	26 825	56	80	25,0
	9,6	876 214,4	23 471,88	64	56	<b>37,3</b>
70Ш1	7,2	1 257 815,8	50 166,67	64	90	25,1
	8,4	1 259 699,3	43 000	64	72	29,3
	9,6	1 411 575,1	37 625	72	56	<b>37,5</b>



**Рис. 9.** График изменения коэффициента приведения длины колонн однопролетной рамы в зависимости от относительной жесткости базы  
**Fig. 9.** Graph of change in the coefficient of conversion of column length of a single-span frame depending on the relative stiffness of the base



**Рис. 10.** График изменения коэффициента снижения прочности однопролетной рамы в зависимости от относительной жесткости базы и гибкости колонн

**Fig. 10.** Graph of change of the strength reduction factor of a single-span frame depending on the relative stiffness of the base and flexibility of the columns

чение коэффициента приведения практически равно значению при «жесткой» заделке опорных узлов рамы, т.е.  $\mu = 2$ .

При величине относительной жесткости  $\frac{S_{ini} \cdot L_c}{E \cdot I_c} = 20$  коэффициент приведения длины колонны  $\mu$  увеличится на 2,4 %, при величине относительной жесткости 15 увеличение коэффициента  $\mu$  составит 4,05 %.

Коэффициент приведения длины оказывает влияние на значение коэффициента уменьшения расчетного сопротивления (прочности) стали. На рис. 10 показаны графики зависимости изменения коэффициента снижения прочности, вычисленного по EN 1993-1-1<sup>6</sup> в зависимости от отношения  $\frac{S_{ini} \cdot L_c}{E \cdot I_c}$  для различных гибкостей колонн.

Из рис. 9, 10 следует, что при больших гибкостях колонн понижающий коэффициент потери устойчивости  $\chi$  падает быстрее. Уровень 5 % достигается при относительной вращательной жесткости базы колонны  $\frac{S_{ini} \cdot L_c}{E \cdot I_c} = 15$  при гибкости колонны, равной  $\lambda = 110$ . Таким образом, значение коэффициента, позволяющего классифицировать базу колонны как жесткую, может быть уменьшено до 20, в ряде случаев до 15.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Выполнена оценка жесткости баз типовых внецентренно сжатых колонн, запроектированных по шифру 8397 «Стальные колонны из широкополочных двутавров и связи из гнutosварных профилей для одноэтажных зданий с покрытием типа “Молодечно”», выпуск 2<sup>2</sup>.

Определено, что на жесткость баз колонн толщина плиты и класс прочности бетона фундамента влияют незначительно. Жесткость на 60 % зависит от марки (класса) стали и диаметра анкерных болтов и высоты колонны.

Поверочными расчетами установлено, что более 50 % типовых баз колонн по шифру 8397 «Стальные колонны из широкополочных двутавров и связи из гнutosварных профилей для одноэтажных зданий с покрытием типа “Молодечно”»<sup>2</sup> попадают в разряд полужестких, что в соответствии с п. 5.2.2.5 (1) EN 1993-1-8 недопустимо. На основании этого рекомендуется пересмотр конструктивных решений, принятых в типовых решениях, или критериев отнесения типа базы колонны к жесткой.

Значение коэффициента  $k_b = 30$  при определении критерия отнесения типа базы колонны к жесткой в формуле  $S_{j,ini} \geq k_b \cdot E \cdot J_b / L_b$  рекомендовано уменьшить до величины  $k_b = 20$ , в ряде случаев до 15, что будет соответствовать снижению несущей способности не более чем на 5 %.

<sup>6</sup> ТКП EN 1993-1-1 (EN 1993-1-1:2005, EN 1993-1-1:2005/AC:2009, IDT). Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1–1. Общие правила и правила для зданий. 2020. 88 с.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Шурин А.Б., Туснин А.Р., Зинкевич И.В., Мухин А.В. Проектирование стальных конструкций в соответствии с требованиями EUROCODES : учебное пособие. М. : АСВ, 2021. 222 с.
2. Шурин А.Б., Надольский В.В. Опыт применения Еврокодов при проектировании стальных конструкций в Республике Беларусь // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 5. С. 740–751. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.740-751. EDN JAVYTK.
3. Шурин А.Б., Мухин А.В. Опыт конструирования ферм из гнутосварных профилей в соответствии с требованиями EN 1993-1 // Сучасні будівельні конструкції з металу та деревини: збірник наукових праць. 2020. № 24. С. 141–149.
4. Tusnina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections // Magazine of Civil Engineering. 2017. № 5 (73). С. 25–39. DOI: 10.18720/MCE.73.3. EDN ZNLKNH.
5. Ferdous W. Effect of beam-column joint stiffness on the design of beams // 23rd Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials. 2014. Pp. 701–706.
6. Bandyopadhyay M., Banik A. Numerical analysis of semi-rigid jointed steel frame using rotational springs // International Conference on Structural Engineering and Mechanics (ICSEM). 2013.
7. Туснина В.М., Платонова В.Д. Численный анализ жесткости фланцевых узлов «балка-колонна» // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 9. С. 28–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33. EDN ELLJF.
8. Wald F., Gresnigt A.M., Weynand K., Jaspart J.P. Application of the Component Method to Column Bases // COST C1 Conference Liege 1998. 1999. Pp. 155–166.
9. Column Bases in Steel Building Frames / ed. K. Weynand. Brussels, 1999.
10. Wald F., Seifert J. The Column-Bases Stiffness Classification // Nordic Steel Colloquium. 1991. Pp. 309–316.
11. Bijlaard F., Steenhuis M. Prediction of the influence of connection behaviour on the strength, deformations and stability of frames, by classification of connections // Proceedings of the Second International Workshop on Connections in Steel Structures. 1992. Pp. 307–318.
12. Jaspart J.P., Wald F.A.E., Weynand K., Gresnigt N. Steel column base classification // HERON. 2008. Vol. 53. Issue 1/2. Pp. 69–86.
13. Ghosh U.K. Design of welded steel structures: principles and practice. Taylor & Francis, 2016. 244 p.
14. Degertekin S.O., Hayalioglu M.S. Design of non-linear semi-rigid steel frames with semi-rigid column bases // Electronic Journal of Structural Engineering. 2004. Vol. 4. Pp. 1–16. DOI: 10.56748/ejse.437
15. Алтамов В.Ю., Лукин А.О., Сахаров А.А. Исследования жесткости узла базы стальной колонны, состоящей из одной опорной плиты // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 9–14. EDN UKFKDV.
16. Fisher J.M., Kloiber L.A. Steel Design Guide 1. Base Plate and Anchor Rod Design. 2nd Edition. AISC, 2006. 62 p.
17. Wald F., Sokol Z. Column Base Stiffness Classification // Stability and Ductility of Steel Structures. 1997. Pp. 675–682.

Поступила в редакцию 13 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 18 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 20 мая 2025 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Андрей Брониславович Шурин** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительных конструкций; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ);** 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267, Республика Беларусь; РИНЦ ID: 6788-4872, Scopus: 57220833497, ORCID: 0000-0003-1396-3503; Shuryn@mail.ru;

**Игорь Владимирович Зинкевич** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ);** 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267, Республика Беларусь; ivzinkevich@mail.ru.

*Вклад авторов:*

Шурин А.Б. — написание раздела «Результаты исследования», построение рис. 1–6, табл. 1–3, формулирование выводов.

Зинкевич И.В. — расчет диаграмм на рис. 7, 8, корректировка табл. 3, формулирование выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Shurin A.B., Tusnin A.R., Zinkevich I.V., Mukhin A.V. *Design of steel structures in accordance with EUROCODES requirements : tutorial*. Moscow, ASV, 2021; 222. (rus.).
2. Shuryin A.B., Nadolski V.V. Experience of implementation of Eurocodes in the design of steel structures in the Republic of Belarus. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):740-751. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.740-751. EDN JAVYTK. (rus.).
3. Shurin A.B., Mukhin A.V. Experience in designing trusses from bent-welded profiles in accordance with the requirements of EN 1993-1. *Everyday structures from metal and wood : collection of scientific works*. 2020; 24:141-149. (rus.).
4. Tusnina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 5(73):25-39. DOI: 10.18720/MCE.73.3. EDN ZNLKNH.
5. Ferdous W. Effect of beam-column joint stiffness on the design of beams. *23rd Australian Conference on the Mechanics of Structures and Materials*. 2014; 701-706.
6. Bandyopadhyay M., Banik A. Numerical analysis of semi-rigid jointed steel frame using rotational springs. *International Conference on Structural Engineering and Mechanics (ICSEM)*. 2013.
7. Tusnina V.M., Platonova V.D. Numerical analysis of the stiffness of the “beam-column” flange joints. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 9:28-33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.09.28-33. EDN ELLLJF. (rus.).
8. Wald F., Gresnigt A.M., Weynand K., Jaspart J.P. Application of the Component Method to Column Bases. *COST C1 Conference Liege 1998*. 1999; 155-166.
9. *Column Bases in Steel Building Frames* / ed. K. Weynand. Brussels, 1999.
10. Wald F., Seifert J. The Column-Bases Stiffness Classification. *Nordic Steel Colloquium*. 1991; 309-316.
11. Bijlaard F., Steenhuis M. Prediction of the influence of connection behaviour on the strength, deformations and stability of frames, by classification of connections. *Proceedings of the Second International Workshop on Connections in Steel Structures*. 1992; 307-318.
12. Jaspart J.P., Wald F.A.E., Weynand K., Gresnigt N. Steel column base classification. *HERON*. 2008; 53(1/2):69-86.
13. Ghosh U.K. *Design of welded steel structures: principles and practice*. Taylor & Francis, 2016; 244.
14. Degertekin S.O., Hayalioglu M.S. Design of non-linear semi-rigid steel frames with semi-rigid column bases. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2004; 4:1-16. DOI: 10.56748/ejse.437
15. Alpatov V.Yu., Lukin A.O., Saharov A.A. The study of rigidity of a steel column base assembly consisting of a support plate. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 9:9-14. EDN UKFKDV. (rus.).
16. Fisher J.M., Kloiber L.A. *Steel Design Guide 1. Base Plate and Anchor Rod Design. 2nd Edition*. AISC, 2006; 62.
17. Wald F., Sokol Z. Column Base Stiffness Classification. *Stability and Ductility of Steel Structures*. 1997; 675-682.

Received April 13, 2025.

Adopted in revised form on May 18, 2025.

Approved for publication on May 20, 2025.

**B I O N O T E S:** **Andrei B. Shuryin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Building Structures; **Brest State Technical University (BSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; ID RSCI: 6788-4872, Scopus: 57220833497, ORCID: 0000-0003-1396-3503; Shuryin@mail.ru;

**Igor V. Zinkevich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Structures; **Brest State Technical University (BSTU)**; 267 Moskovskaya st., Brest, 224017, Republic of Belarus; ivzinkevich@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Andrei B. Shuryin* — writing the section “research results”, constructing Fig. 1–6, Table 1–3, conclusions.

*Igor V. Zinkevich* — calculation of diagrams in Fig. 7, 8, correction of Table 3, conclusions.

*The authors declare that there is no conflict of interest.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.059

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1061-1071

## Вероятностный критерий оценки живучести железобетонных рам при локализации разрушения

Ашот Георгиевич Тамразян, Анатолий Викторович Алексейцев,  
Елена Сергеевна Мишина

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проблема обеспечения механической безопасности зданий и сооружений при аварийных воздействиях силового и среднего характера сопряжена с необходимостью оценки их живучести. Свойство живучести объектов проявляется после наступления аварийной ситуации и тесно связано с процессом оценки устойчивости конструктивной системы к прогрессирующему разрушению. В настоящее время существуют предложения по оценке живучести в концептуальном виде и в виде общих аналитических выражений, требующих адаптации к конкретной конструктивной системе. Предлагаются методика и пример одного из вероятностных показателей расчета живучести.

**Материалы и методы.** Вероятностный показатель вычисляется на основе классической теории надежности с модификацией формулы для индекса надежности, в которую входят значения случайных величин изгибающих моментов, воспринимаемых сечением, и моментов, вызванных внешней нагрузкой. Показатель вычисляется для схемы разрушения, не предполагающей образование вантового механизма, т.е. прогрессирующее разрушение локализуется путем образования нескольких пластических шарниров с учетом работы бетона в предельном состоянии. Для моделирования случайных величин используется метод статистических испытаний с учетом экспериментальных данных о разбросах нагрузок и механических характеристик материалов.

**Результаты.** Рассмотрен пример двух сценариев аварийных воздействий на монолитную раму многоэтажного здания, превентивно спроектированную с учетом возможности восприятия аварийных воздействий. Смоделированы разбросы предельных изгибающих моментов, вычислены характеристики надежности предлагаемой методики на конкретных примерах работы системы с учетом локализации прогрессирующего разрушения, вероятностный показатель живучести для каждой аварийной ситуации.

**Выводы.** Предложена методика количественной оценки живучести на основе вероятностного показателя, учитывающего возможность безотказной работы части конструктивных элементов системы и отказа отдельных элементов в зоне локализации аварийного воздействия. Показана работоспособность предлагаемой методики на конкретных примерах, что позволит оценивать живучесть как проектируемых, так и восстанавливаемых конструктивных систем.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** механическая безопасность, живучесть, локальные повреждения, аварийная ситуация, прогрессирующее разрушение, деформации, надежность, вероятность отказа

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Тамразян А.Г., Алексейцев А.В., Мишина Е.С. Вероятностный критерий оценки живучести железобетонных рам при локализации разрушения // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 1061–1071. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1061-1071

Автор, ответственный за переписку: Анатолий Викторович Алексейцев, aalexw@mail.ru.

## Probabilistic criterion for assessing the robustness of reinforced concrete frames during fracture localization

Ashot G. Tamrazyan, Anatoly V. Alekseytsev, Elena S. Mishina

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The problem of ensuring mechanical safety of buildings and structures under emergency impacts of force and environmental character is associated with the need to assess their robustness. The property of robustness of objects is manifested after the onset of an emergency situation and is closely related to the process of assessing the stability of a structural system to progressive collapse. Currently, there are proposals for robustness assessment in conceptual form and in the form of general analytical expressions that require adaptation to a specific structural system. This paper proposes a methodology and an example of the probabilistic indices of robustness calculation.

**Materials and methods.** The probabilistic index is calculated on the basis of the classical reliability theory with modification of the formula for the reliability index, which includes the values of random values of bending moments perceived by the section and moments caused by external load. The index is calculated for a failure pattern that does not involve the formation of a cable-stayed mechanism, i.e. the progressive failure is localized by the formation of several plastic hinges, taking into

account the operation of the concrete in the limit state. A statistical test method is used to model random variables, considering experimental data on load variation and mechanical characteristics of materials.

**Results.** An example of two scenarios of accidental impacts on the monolithic frame of a multistory building, preventively designed with consideration of the possibility to taking accidental impacts, is considered. The scattering of ultimate bending moments is simulated, the reliability characteristics of elements, the probabilities of failure-free operation of the system with account of localization of progressive failure are calculated, the probabilistic survivability index for each emergency situation is calculated.

**Conclusions.** The methodology of quantitative assessment of survivability on the basis of probabilistic index, which includes the possibility of failure-free operation of a part of structural elements of the system and failure of individual elements in the zone of localization of emergency impact, is proposed. The operability of the proposed methodology on specific examples is shown, which will allow to estimate the robustness of both designed and reconstructed structural systems.

**KEYWORDS:** mechanical safety, robustness, localized damage, emergency situation, progressive collapse, deformations, reliability, failure probability

**FOR CITATION:** Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V., Mishina E.S. Probabilistic criterion for assessing the robustness of reinforced concrete frames during fracture localization. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):1061-1071. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1061-1071(rus.).

*Corresponding author:* Anatoly V. Alekseytsev, aalexw@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные социально-экономические условия предполагают проектирование новых зданий и сооружений с повышенными требованиями к механической безопасности. Кроме этого, имеется объективная необходимость оценки степени этой безопасности для существующих объектов. Одним из свойств конструктивных систем, в значительной мере определяющих уровень стойкости зданий и сооружений к прогрессирующему разрушению, является живучесть при запроектных воздействиях [1–4]. При этом ряд исследователей для оценки живучести использует один интегральный или несколько частных детерминированных показателей.

Есть концепции, в которых оценка живучести представляется вероятностными показателями, а свойство живучести трактуется как комплексная характеристика [1, 5, 6]. Тем не менее как понятие «живучесть» в современной научной литературе имеет около десятка различных определений, так как критерии ее оценки до сих пор считаются недостаточно изученными. В зарубежной литературе это свойство получило термин *robustness* и также активно изучается, в частности, на примерах различных типов конструкций в рамках численных [7–10] и экспериментальных [11–13] исследований. Активно исследуются разные аспекты, связанные с обеспечением живучести, при этом актуальным становится мера ее количественной оценки [14] как на детерминированной, так и на вероятностной основе. Так, в публикации [15] рассматривается методика оценки живучести в условиях неопределенности сценариев прогрессирующего разрушения. В статье [16] изучается влияние коррозии как среднего воздействия на свойство живучести конструктивной системы. Ряд работ посвящен изучению вопросов расчета конструкций при прогрессирующем разрушении, что также влияет на достоверность оценки их живучести при наступлении аварийной ситуации, это и критерии предельного состояния [17], и наличие начальных локальных повреждений

в конструктивной системе [18], и в целом подходы к формированию алгоритмов расчета с учетом специфики переходного динамического процесса и различного типа нелинейностей [19]. В отдельных трудах живучесть конструктивной системы входит в более широкие концептуальные подходы, связанные с рассмотрением не только конкретной аварийной ситуации, но и с обеспечением механической безопасности конструкции на всех этапах жизненного цикла [20]. Такая специфика подходов требует классификации различных типов зданий и сооружений по возможности защиты от прогрессирующего разрушения, что, например, для промышленных зданий выполнено в работе [21].

В настоящем исследовании на основе концептуальных предложений [1, 3] вводится вероятностный показатель оценки живучести конструктивной системы, основанный на критериях образования пластического шарнира для схем обрушения, в которых не образуется вантовый механизм. Такие схемы характерны для частичного исключения из работы ригелей или стоек рамных каркасов зданий.

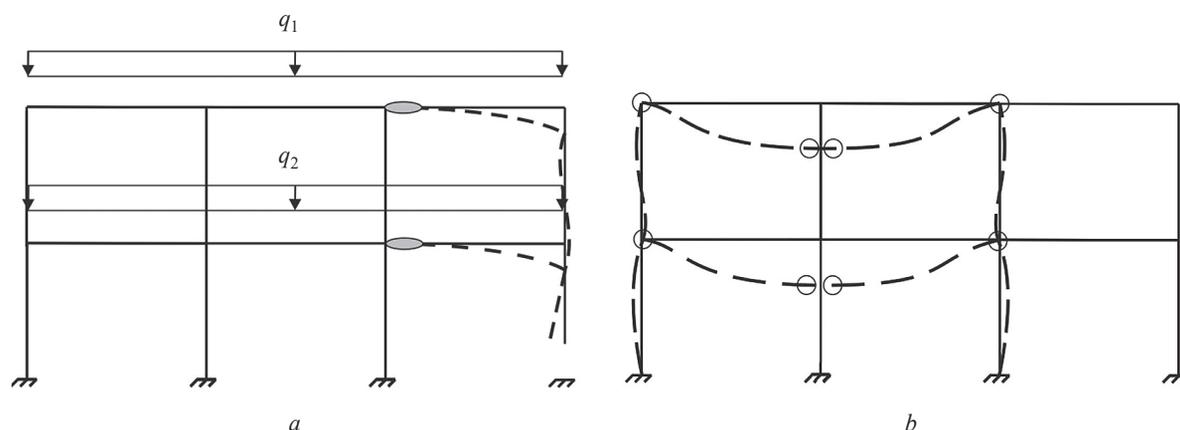
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Постановка задачи

Требуется разработать количественный показатель оценки живучести рамной конструктивной схемы из монолитного железобетона. Качественная трактовка живучести состоит в обеспечении локализации прогрессирующего разрушения. Такой локализации можно добиться при обеспечении следующих условий.

1. Для безвантовых схем разрушения (рис. 1, *a*) — образование пластического шарнира в опасном сечении (табл. 1).

2. Для вантовых схем разрушения (рис. 1, *b*) — условие неразрывности арматуры вантового механизма и достаточность ее анкеровки, применяемое к ригелям. Для колонн может использоваться условие из табл. 1.



**Рис. 1.** Возможные схемы разрушения: безвантовая (а); вантовая (b) (серым цветом затушевана область образования пластического шарнира)

**Fig. 1.** Possible failure patterns: cable-less (a); cable-stayed (b) (the area of plastic hinge formation is shaded in grey)

**Табл. 1.** Условия расчета по прочности прямоугольных сечений железобетонных элементов

**Table 1.** Conditions for calculating the strength of rectangular sections of reinforced concrete elements

Ригели Beams	Колонны Columns
$M < M_{ult}$ где $M$ — изгибающий момент в результате аварийного воздействия; $M_{ult}$ — предельный момент, воспринимаемый сечением при контроле деформаций $\epsilon$ , не превышающих деформаций разрыва $\epsilon_u$ ; $\epsilon < 0,9\epsilon_u$ where $M$ — bending moment as a result of accidental impact; $M_{ult}$ — ultimate moment perceived by the section at control deformations $\epsilon$ , not exceeding rupture deformations $\epsilon_u$ ; $\epsilon < 0,9\epsilon_u$	$Ne < M_{ult}; N < N_{ult}$ где $e$ — эксцентриситет продольной силы, вычисляемый с учетом начальных геометрических несовершенств и действующего в сечении изгибающего момента; $M_{ult} = R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a')$ в соответствии с п. 8.1.14 СП 63.13330.2018; $N, N_{ult}$ — действующее в сечении и предельное значение силы, воспринимаемое сечением соответственно where $e$ — eccentricity of the longitudinal force, calculated taking into account the initial geometrical imperfections and the bending moment acting in the section; $M_{ult} = R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} A'_s (h_0 - a')$ in accordance with clause 8.1.14 of CP 63.13330.2018; $N, N_{ult}$ — acting in the section and the limit value of the force perceived by the section, accordingly

**Вероятностные характеристики, используемые для количественной оценки живучести**

В качестве расчета параметров, используемых для оценки показателя живучести, будем использовать известные выражения для индекса надежности и вероятности отказа [19, 20].

Для ригеля при безвантовой схеме разрушения применяем зависимость, определяющую индекс надежности  $\beta_R$ :

$$\beta_R = \frac{|M_{ult}| - |M_{max}|}{\sqrt{S(M_{ult})^2 + S(M_{max})^2}} \tag{1}$$

где  $M_{ult}, M_{max}$  — предельные изгибающие моменты в одном сечении, соответственно воспринимаемые железобетоном, и максимальные от аварийного воздействия;  $S(M_{ult}), S(M_{max})$  — соответствующие среднеквадратические стандарты случайных величин моментов.

Для колонн, догружаемых в результате аварийного воздействия:

$$\beta_C = \frac{(|N_{ult}| - |N_{max}|) \cdot e}{\sqrt{S(eN_{ult})^2 + S(eN_{max})^2}} \tag{2}$$

где  $N_{ult}, N_{max}$  — предельное усилие в колонне, воспринимаемое сечением, и усилие, создаваемое внешним воздействием соответственно;  $e$  — эксцентриситет продольной силы из статического расчета;  $S(eN_{ult}), S(eN_{max})$  — среднеквадратические стандарты соответствующих случайных величин.

Следует отметить, что выражение (2) можно использовать для случая сжатия колонн. Если в результате догружения возникает растяжение, то величина  $N_{ult}$  должна определяться по методике расчета растянутых элементов. Величины стандартов при отсутствии экспериментальных данных могут быть найдены с помощью метода статистических испытаний, при котором соответствующие случай-

ные величины генерируются по нормальному распределению.

Для ригелей, работающих в условиях вантовой схемы разрушения, условия неразрушимости и обеспечения анкеровки вантового механизма, выраженные через индексы надежности, можно представить в виде:

$$\beta_{RV1} = \frac{|\varepsilon_u| - |\varepsilon_{\max}|}{\sqrt{S(\varepsilon_u)^2 + S(\varepsilon_{\max})^2}}; \quad (3)$$

$$\beta_{RV2} = \frac{l_{an} - l_{an}^{ef}}{\sqrt{S(l_{an})^2 + S(l_{an}^{ef})^2}}; \quad (4)$$

где  $\varepsilon_u, \varepsilon_{\max}$  — деформации растяжения в арматуре, соответствующие ее временному сопротивлению и фактически наблюдаемые при аварийном воздействии;  $l_{an}, l_{an}^{ef}$  — расчетная и фактическая длина анкеровки арматуры вантового механизма;  $S(\varepsilon_u), S(\varepsilon_{\max}), S(l_{an}), S(l_{an}^{ef})$  — среднеквадратические стандарты случайных величин относительных деформаций.

### Вероятностный показатель живучести

Предложения по систематизации детерминированных и вероятностных показателей живучести, а также их типы приведены в работе [4]. В развитие этих исследований для оценки живучести рамных железобетонных систем введем показатель живучести  $W_R$ :

$$W_R = P_{no}(1 - P_{dam}), \quad (5)$$

где  $P_{no}$  — вероятность безотказной работы рамной системы при нормальной эксплуатации. При традиционном проектировании эта величина составляет  $P_{no} = 0,98 - 1$ , при оптимальном проектировании без учета аварий  $P_{no} = 0,95 - 1$ ;  $P_{dam}$  — вероятность отказа конструктивной системы при аварийном воздействии. В случае «идеальной» (абсолютной) живучести  $W_R = 1$ , при этом  $P_{no} = 1, P_{dam} = 0$ .

При наличии в системе  $m$  конструктивных элементов  $m = m_R + m_c$  ( $m_R$  — число ригелей;  $m_c$  — число колонн) в расчетных случаях, соответствующих зависимостям (1) и (2), безвантовая схема — показатель живучести  $W_R$  может быть вычислен так:

$$W_R = \prod_{i=1}^{m_R} (P_{no,i} (1 - P_{dam,i})) \prod_{j=1}^{m_c} (P_{no,j} (1 - P_{dam,j})), \quad (6)$$

где  $P_{no,i}, P_{no,j}$  — вероятности безотказной работы элемента (ригеля или колонны) рамы при нормальной эксплуатации;  $P_{dam,i}$  — вероятность отказа колонны  $i$  при наступлении аварийной ситуации;  $P_{dam,j}$  — вероятность отказа ригеля  $j$  при наступлении аварийной ситуации. Величины вероятностей отказа могут быть определены по общей формуле:

$$P_{dam,i} = 1 - (0,5 + \Phi(\beta_i)), \quad (7)$$

где  $\Phi(\beta_i)$  — значение интеграла Лапласа, соответствующее индексу надежности  $\beta_i$  конструктивного

элемента. Поскольку наибольшая вероятность отказа  $P_{dam}^{\max} = 0,5$ , то живучесть системы считается необеспеченной, если в общем случае выполняется условие:

$$\left( \prod_{i=1}^{m_R} ( ) \right) \vee \left( \prod_{j=1}^{m_c} ( ) \right) = [0,45 \pm 0,5]. \quad (8)$$

В частном случае при безотказной работе всех колонн и отказе ригелей (или наоборот) система считается живучей при  $W_R > 0,55$ .

Следует отметить, что при различных аварийных ситуациях необходимо учитывать последовательную или параллельную схему последовательных отказов элементов. Так, например, вероятность отказа для системы из трех последовательно отказывающихся ригелей определится как сумма вероятностей их отказа  $P_{dam} = P_{dam1} + P_{dam1} \cdot P_{dam2} + P_{dam1} \cdot P_{dam2} \cdot P_{dam3}$ , где каждое слагаемое оценивает вероятность отказа ригеля с учетом возможности последовательных отказов ригелей, связанных с прогрессирующим разрушением первого ригеля.

В случае реализации вантового механизма вероятность отказа  $i$ -го ригеля будет определяться с учетом выражений (3), (4) в виде:

$$P_{dam,i} = \left[ 1 - (0,5 + \Phi(\beta_{RV1,i})) \right] \left[ 1 - (0,5 + \Phi(\beta_{RV2,i})) \right]. \quad (9)$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведем пример оценки живучести рамы при безвантовой схеме разрушения. Рассмотрим конструкцию железобетонной рамы, схема которой показана на рис. 2. Крестиками обозначены возможные сценарии аварийной ситуации с последующей локализацией разрушения по безвантовой схеме. Рама проектировалась на действующие эксплуатационные нагрузки (собственный вес, ветер, снег и полезная нагрузка  $150 \text{ кН/м}^2$  при шаге рам 6 м).

При проектировании предусматривался запас прочности, который будет использован при возникновении аварийной ситуации. Принят бетон класса прочности на сжатие В30, расстояния от центра тяжести арматуры до верхнего бетонного волокна для всех конструктивных элементов — 25 мм. Рабочая продольная арматура принята класса прочности А400, поперечная — А240. Характеристики армирования колонн и ригелей представлены на рис. 3.

Среднеквадратические стандарты случайных величин нагрузок и характеристик бетона и арматуры определим методом статистических испытаний. Считаем, что разброс значений предельной нагрузки и механических характеристик бетона и арматуры имеет один и тот же порядок. Поэтому при определении  $S(M_{ult})^2, S(M)^2$  сгенерируем опорную выборку  $\omega$  чисел от нуля до единицы, основываясь на экспериментальных значениях коэффициента вариации бетона и стальной арматуры, а также разброса нагрузок, приведенного в работе [20] (табл. 2). Визуализация

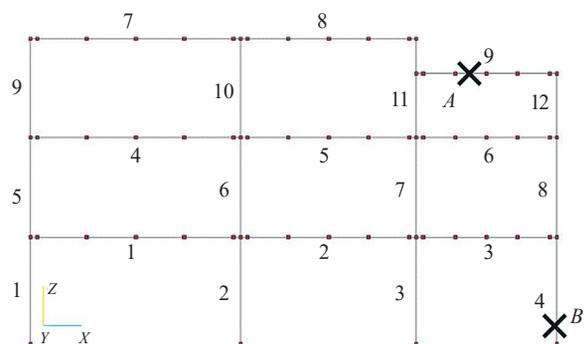


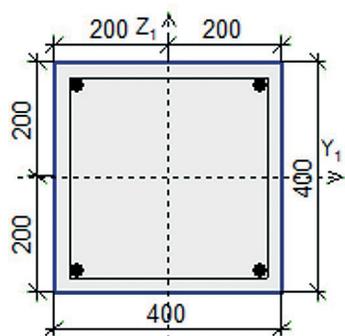
Рис. 2. Расчетная схема рамы: 1–12 — номера колонн; 1–9 — номера ригелей (слева направо по этажам)

Fig. 2. Calculation scheme of the frame: 1–12 — column numbers; 1–9 — beam numbers (from left to right by floors)

этих данных представлена на рис. 2. В дальнейшем, используя значения выборки  $\omega$ , будем получать варианты  $M_{ult}$  и  $M$  на основе выражений  $M_{ult,i} = \omega_i \bar{M}_{ult}$ ,  $M_i = \omega_i M$ , где  $\bar{M}_{ult}$ ,  $\bar{M}$  — математические ожидания этих величин, принимаемые, в частности, равными значениям расчетного предельного момента для сечения и момента, вызванного внешней нагрузкой. Синтетические данные для разброса расчетного сопротивления арматурной стали и полученные значения выборочной совокупности для  $M_{ult}$  показаны на рис. 4.

Для вычисления вероятностного показателя живучести системы по формуле (5) выполняем ряд следующих этапов:

- вычисление вероятности безотказной работы системы при ее нормальной эксплуатации, которая



Продольная арматура (первый ряд)

S <sub>1</sub>		S <sub>2</sub>		S <sub>3</sub>	
Ø мм	шт	Ø мм	шт	Ø мм	шт
28	2	28	2	40	0

Поперечная арматура

S <sub>wZ</sub>			S <sub>wY</sub>		
Ø мм	шаг(мм)	шт	Ø мм	шаг(мм)	шт
6	100	2	6	100	2

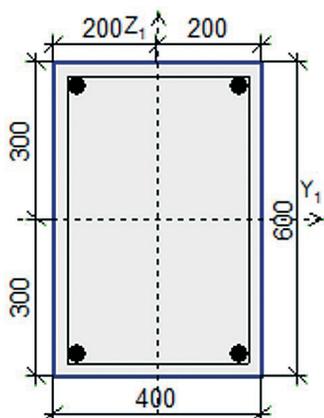
Longitudinal reinforcement (first row)

S <sub>1</sub>		S <sub>2</sub>		S <sub>3</sub>	
Ø mm	pieces	Ø mm	pieces	Ø mm	pieces
28	2	28	2	40	0

Transverse reinforcement

S <sub>wZ</sub>			S <sub>wY</sub>		
Ø mm	spacing(mm)	pieces	Ø mm	spacing(mm)	pieces
6	100	2	6	100	2

a



Продольная арматура (первый ряд)

S <sub>1</sub>		S <sub>2</sub>		S <sub>3</sub>	
Ø мм	шт	Ø мм	шт	Ø мм	шт
36	2	36	2	40	0

Поперечная арматура

S <sub>wZ</sub>			S <sub>wY</sub>		
Ø мм	шаг(мм)	шт	Ø мм	шаг(мм)	шт
12	100	2	8	100	2

Longitudinal reinforcement (first row)

S <sub>1</sub>		S <sub>2</sub>		S <sub>3</sub>	
Ø mm	pieces	Ø mm	pieces	Ø mm	pieces
36	2	36	2	40	0

Transverse reinforcement

S <sub>wZ</sub>			S <sub>wY</sub>		
Ø mm	spacing(mm)	pieces	Ø mm	spacing(mm)	pieces
12	100	2	8	100	2

b

Рис. 3. Проектные параметры сечений колонн (a) и ригелей (b)

Fig. 3. Design parameters of column sections (a) and beams sections (b)

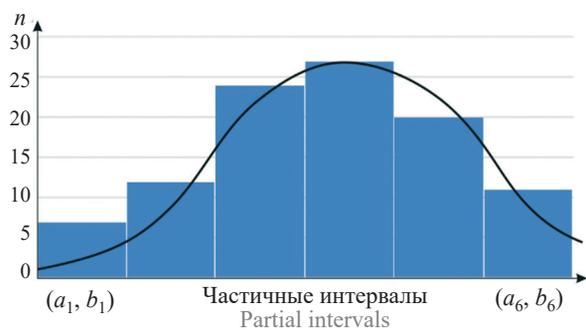


Рис. 4. Визуализация данных сгенерированной выборочной совокупности  $\omega$  в виде гистограммы  $(a_1, b_1) - (a_6, b_6)$  — интервалы с не менее чем шести вариантами наблюдаемой случайной величины

Fig. 4. Visualization of the generated specimen data set of in the form of  $\omega$  a histogram  $(a_1, b_1) - (a_6, b_6)$  — intervals with at least 6 variants of the observed random variable

составляет произведение соответствующих вероятностей для элементов и при традиционном проектировании близко к единице; вычисления показали, что в рассматриваемой системе ригели имеют

$$\prod_{i=1}^9 P_{no,i} \approx 1, \text{ как и колонны } \prod_{j=1}^{12} P_{no,j} \approx 1;$$

Табл. 2. Выборочная совокупность из 100 значений для определения среднеквадратических стандартов для предельных усилий  
Table 2. Specimen set of 100 values for determining root mean square standards for ultimate forces

$\omega_{1-10}$	$\omega_{11-20}$	$\omega_{21-30}$	$\omega_{31-40}$	$\omega_{41-50}$	$\omega_{51-60}$	$\omega_{61-70}$	$\omega_{71-80}$	$\omega_{81-90}$	$\omega_{91-100}$
0,980	0,112	0,733	0,266	0,212	0,140	0,740	0,847	0,233	0,368
0,070	0,370	0,017	0,540	0,028	0,757	0,336	0,611	0,812	0,355
0,115	0,209	0,591	0,708	0,896	0,438	0,885	0,981	0,961	0,189
0,069	0,896	0,250	0,715	0,926	0,567	0,458	0,187	0,917	0,904
0,938	0,463	0,396	0,623	0,753	0,674	0,010	0,701	0,093	0,989
0,329	0,969	0,398	0,627	0,914	0,486	0,471	0,836	0,759	0,500
0,079	0,127	0,843	0,105	0,245	0,025	0,742	0,050	0,565	0,629
0,810	0,441	0,831	0,752	0,327	0,022	0,293	0,574	0,419	0,003
0,196	0,935	0,960	0,149	0,981	0,667	0,525	0,066	0,297	0,016
0,958	0,166	0,248	0,937	0,705	0,453	0,368	0,052	0,431	0,761

Табл. 3. К вычислению величины  $P_{dam}$  (сценарий А)

Table 3. To the calculation of the value  $P_{dam}$  (scenario A)

Номер ригеля Number of the beams	$M/M_{ulr}$ опора Support	$M/M_{ulr}$ пролет Span	$\beta_R$	$\Phi(\beta_b)$	$P_{dam,i}$
1	144,9/227,3	113,5/227,3	2,33	0,4898	$1,02 \cdot 10^{-2}$
2	112,68/227,3	57,01/227,3	3,24	0,49931	$6,9 \cdot 10^{-4}$
3	52,58/227,3	35,91/227,3	4,94	0,49999	$1 \cdot 10^{-5}$
4	131,83/227,3	113,4/227,3	2,7	0,4965	$3,5 \cdot 10^{-3}$
5	151,58/227,3	33,85/227,3	2,14	0,4838	$1,62 \cdot 10^{-2}$
6	138,93/227,3	214,19/227,3	0,37	0,1443	0,3557
7	159,57/227,3	126,63/227,3	1,91	0,4719	$2,81 \cdot 10^{-2}$
8	120,67/227,3	76,04/227,3	3,01	0,49865	$1,35 \cdot 10^{-3}$
9	108,79/227,3	>1	0	0	0,5

- вычисление вероятности безотказной работы ригелей и колонн при реализации исключения одной из колонн (для элементов рамы в этом случае реализуется параллельная схема отказов);

- вычисление вероятности безотказной работы ригелей при реализации исключения одного из ригелей и сохранности колонн (для ригелей рамы в этом случае реализуется последовательная схема отказов).

Рассмотрим аварийную ситуацию А. В этом случае вероятность отказа колонн близка к нулю вследствие предусмотренного запаса прочности, а для ригелей проведен следующий расчет. Для ригеля 9 (см. рис. 2) выполнено удаление элемента в пролете, что имитирует его выход из работы. В результате аварийная нагрузка на покрытие 150 кН/м частично воспринимается нижележащим ригелем с коэффициентом динамики 2,0. При этом условия анкеровки предполагают образование вантового механизма и локализацию прогрессирующего разрушения в этом ригеле. Тогда, следуя формуле (7), вычислим для ригелей рамной системы вероятности безотказной работы (табл. 3). Считаем, что для ригелей, которые не подвергаются действию аварийной

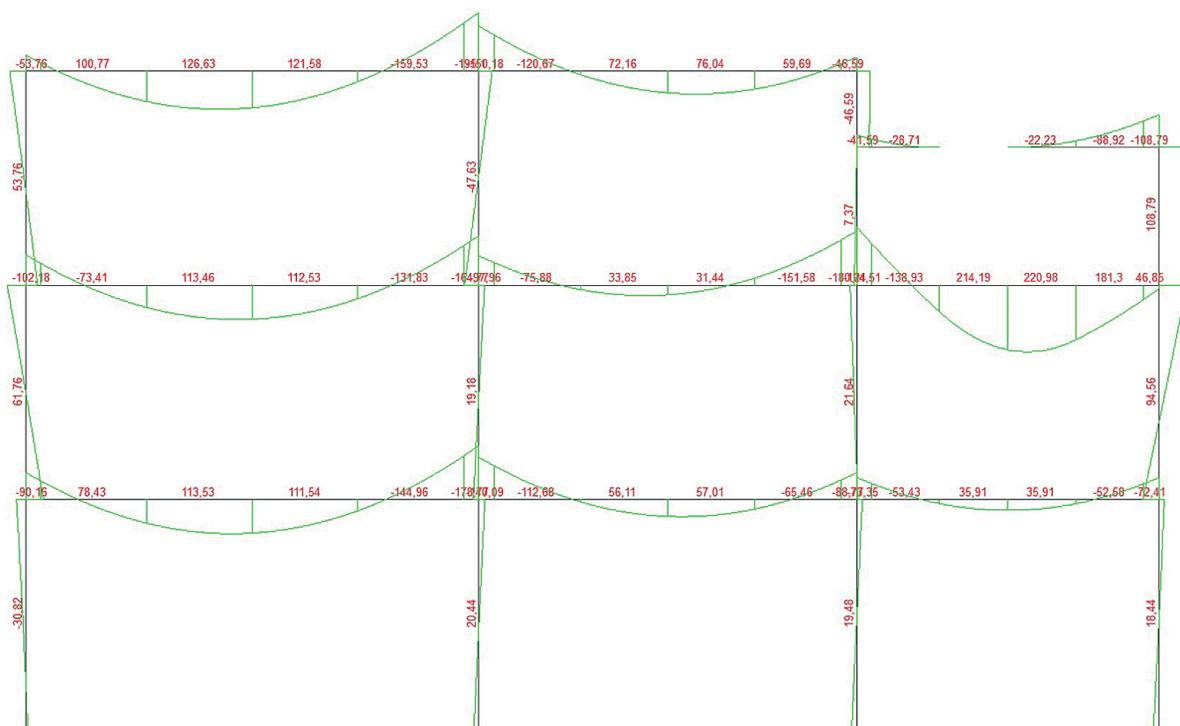


Рис. 5. Эпюра изгибающих моментов в раме при аварийной ситуации А

Fig. 5. Bending moment diagram in the frame in emergency situation A

ситуации, вероятность безотказной работы равна 0,999999. Предельные значения усилий для ригелей и колонн в соответствии с рис. 3:  $N_{ult,c} = 3300$  кН,  $M_{ult,b}^{span} = M_{ult,b}^{sup} = 227,3$  кНм. В данной аварийной ситуации значения продольных сил в колонне уве-

личились не более чем на 5 %, поэтому в расчетах их не рассматриваем, считая вероятность их безотказной работы также близкой к единице.

Данные в табл. 3 по фактическим средним значениям  $M$  получены из рис. 5.

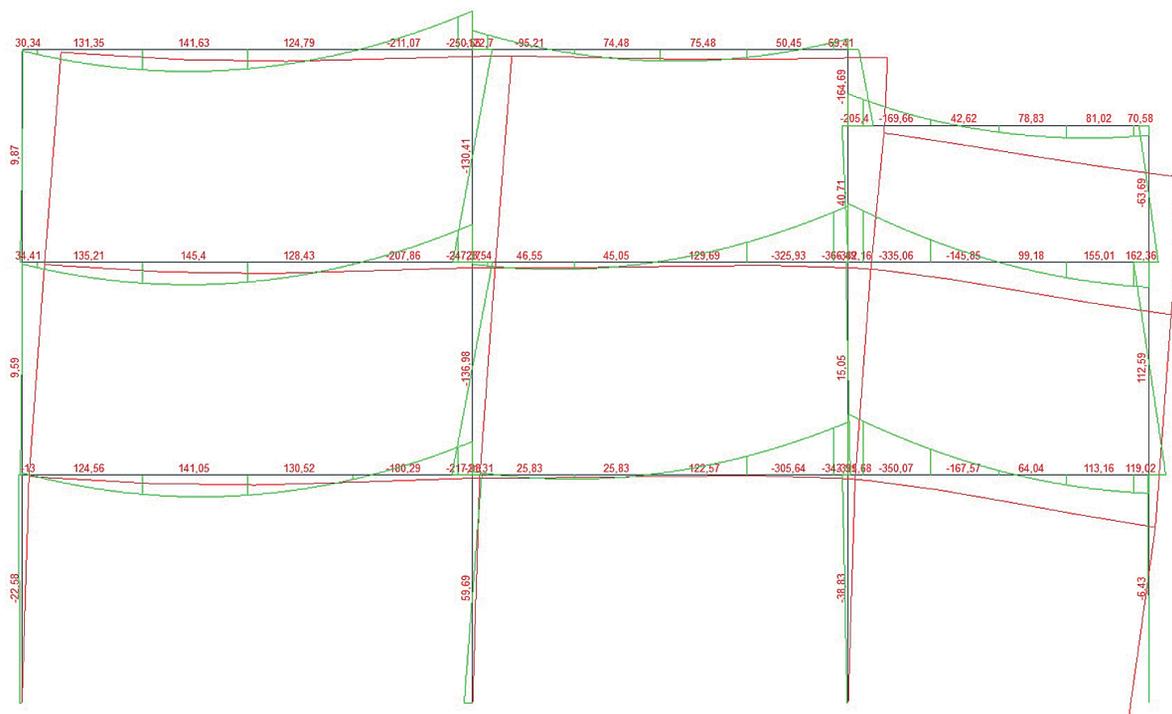


Рис. 6. Эпюра изгибающих моментов в раме при аварийной ситуации В

Fig. 6. Bending moment diagram in the frame in emergency situation B

Табл. 4. К вычислению величины  $P_{dam}$  (сценарий В)  
 Table 4. To the calculation of the value  $P_{dam}$  (scenario B)

Номер ригеля Number of the beams	$M/M_{ult}$ опора Support	$M/M_{ult}$ пролет Span	$\beta_R$	$\Phi(\beta_b)$	$P_{dam,i}$
1	217/227,3	141/227,3	0,28	0,1103	0,3897
2	305/227,3	122/227,3	0	0	0,5
3	350/227,3	64/227,3	0	0	0,5
4	207/227,3	145/227,3	0,56	0,2123	0,2877
5	325/227,3	129/227,3	0	0	0,5
6	335/227,3	99/227,3	0	0	0,5
7	211/227,3	141/227,3	0,45	0,1736	0,3264
8	95/227,3	75/227,3	3,7	0,4998	$2 \cdot 10^{-4}$
9	169/227,3	78/227,3	1,64	0,4495	$5,05 \cdot 10^{-2}$

Формула (6) с учетом безотказной работы колонн для этого сценария принимает вид:

$$W_R = \prod_{i=1}^{m_k-1} (P_{no,i} (1 - P_{dam,i})),$$

используя данные табл. 3 получим:  $W_R \approx 1 \cdot (1 - (0,3557 + 0,3557 \cdot 10^{-5})) \approx 0,6443$ , условие (8) удовлетворено, система обладает живучестью.

Рассмотрим аварийную ситуацию В (рис. 2). Аварийную ситуацию моделируем в виде статической просадки основания под крайней колонной, т.е. динамический эффект не учитываем. Анализ деформирования рамы при такой аварийной ситуации показывает, что элементы могут отказывать по параллельной схеме, следовательно, для ригелей находим величину вероятности отказа произведением вероятностей отказа элементов. Пользуясь рис. 6, заполняем табл. 4. В данной аварийной ситуации колонна также получает динамическое догружение, поэтому живучесть проверяем по условию (8).

Находим для ригелей:

$$\prod_{i=1}^9 (P_{no,i} (1 - P_{dam,i})) = (1 \cdot (1 - 0,3897)) \cdot (1 - 0,5)^4 \cdot 1 \times \\ \times (1 - 0,2877) \cdot 1 \cdot (1 - 0,3264) \cdot 1 \cdot (1 - 2 \cdot 10^{-4}) \cdot 1 \times \\ \times (1 - 5,05 \cdot 10^{-2}) \approx 0,017.$$

Условие (8) не выполняется, в проверке вероятности отказа колонн нет необходимости, аварийная ситуация В демонстрирует явную нецелесообразность обеспечения живучести по безвантовой схеме путем увеличения сечения или армирования.

Перспективы выполненной работы состоят в развитии теоретических положений на дру-

гие типы каркасов зданий, в том числе высотных и уникальных, при этом целесообразно рассматривать не только этап проектирования конструкций с целью предотвращения возможных аварий, но и период нормальной эксплуатации конструктивной системы, в котором могут накапливаться повреждения как от силовых воздействий (перегрузки, перепланировки и т. п.), так и от средовых воздействий, например от коррозионных повреждений. В качестве аварийных ситуаций можно рассматривать помимо исключения колонн действие стандартного пожара и различные сценарии коррозионных повреждений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика количественной оценки живучести на основе вероятностного показателя, учитывающего возможность безотказной работы части конструктивных элементов системы и отказа отдельных элементов в зоне локализации аварийного воздействия.

На примере безвантовой схемы локализации аварийного воздействия на монолитную раму показана работоспособность предлагаемой методики, что позволит оценивать живучесть как проектируемых, так и восстанавливаемых конструктивных систем.

С помощью предлагаемой методики вероятностной оценки доказана нецелесообразность обеспечения живучести путем увеличения сечения конструктивных элементов, что согласуется с исследованиями аналогичной аварийной ситуации другими авторами.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тамразян А.Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 3. № 3. С. 62–74. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.3.62-74. EDN IKRNWX.
2. Колчунов В.И., Ильющенко Т.А., Федорова Н.В., Савин С.Ю., Тур В.В., Лизогуб А.А. Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений : аналитический обзор исследований // Строительство и реконструкция. 2024. № 3 (113). С. 31–71. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71. EDN FHLGWH.
3. Тамразян А.Г. Живучесть как степень работоспособности конструкций при повреждении // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 7. С. 22–28. DOI: 10.33622/0869-3019.2023.07.22-28. EDN DTAOGR.
4. Kolchunov V.I., Savin S.Yu. Survivability criteria for reinforced concrete frame at loss of stability // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 4 (80). Pp. 73–80. DOI: 10.18720/MCE.80.7EDNXYLDTF.
5. Lan X., Li Z., Fu F., Qian K. Robustness of steel braced frame to resist disproportionate collapse caused by corner column removal // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 69. P. 106226. DOI: 10.1016/J.JOBE.2023.106226
6. Колчунов В.И., Федорова Н.В., Савин С.Ю., Амелина М.А. Вероятностная модель отказа железобетонной рамы при потере устойчивости // Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 10. С. 4–11. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.10.04-11. EDN KYFSCZ.
7. Qu T., Zeng B., Zhou Z., Huang L., Chang D. Dynamic and uncertainty-based assessment of the progressive collapse probability of prestressed concrete frame structures with infill walls // Structures. 2024. Vol. 61. P. 106105. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2024.106105
8. Ding L., Chen J., Caspeele R. Determination of dynamic collapse limit states using the energy-based method for multi-story RC frames subjected to column removal scenarios // Engineering Structures. 2024. Vol. 311. P. 118170. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.118170
9. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // Engineering Structures. 2018. Vol. 173. Pp. 122–149. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.082
10. Wang S., Cheng X., Li Y., Yang X., Zhang H., Guo R. et al. Assessing progressive collapse regions of reinforced concrete frame structures using Graph Convolutional Networks // Engineering Structures. 2025. Vol. 322. P. 119076. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.119076
11. Husain M., Yu J., Osman B.H., Ji J. Progressive collapse resistance of post-tensioned concrete beam-column assemblies under a middle column removal scenario // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 34. P. 101945. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101945
12. Касимов П.Г., Скворцова Е.О. Прогрессирующее разрушение и защита от него каменных зданий // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство : сб. ст. 2019. С. 809–816. EDN JWROEE.
13. Бессонов С.Н., Солодов Н.В. Живучесть пространственных решетчатых конструкций из труб типа «кислородск» при расчете на прогрессирующее (лавинообразное) обрушение // Научное издание «XXV научные чтения» : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. 2023. С. 76–80. EDN PPBABI.
14. Qian K., Weng Yu.H., Fu F., Deng X.F. Numerical evaluation of the reliability of using single-story substructures to study progressive collapse behaviour of multi-story RC frames // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 33. P. 101636. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101636. EDN KMLTXW.
15. Praxedes C., Yuan X.-X. Robustness-oriented optimal design for reinforced concrete frames considering the large uncertainty of progressive collapse threats // Structural Safety. 2022. Vol. 94. P. 102139. DOI: 10.1016/j.strusafe.2021.102139
16. Тамразян А.Г., Тягун Д.В. О влиянии коррозионного повреждения на конструктивные характеристики изгибаемых железобетонных элементов при определении живучести // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : мат. Междунар. академических чтений. 2023. С. 156–162. EDN UTPYXZ.
17. Кабанцев О.В., Митрович Б. К выбору характеристик предельных состояний монолитных железобетонных несущих систем для режима прогрессирующего обрушения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 6 (378). С. 234–241. EDN TTXZYZ.
18. Алексейцев А.В., Антонов М.Д. Сопrotивляемость прогрессирующему разрушению монолитных каркасов зданий при локальных повреждениях узлов от продавливания // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 9. С. 1454–1468. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1454-1468. EDN KBUTDH.
19. Серник И.Н., Курченко Н.С., Алексейцев А.В., Лагутина А.А. Анализ в геометрически, физически и конструктивно нелинейной постановке динамического поведения плоских рам при запроектных воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 49–51. EDN PFGIFZ.

20. Терехов И.А., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Шмаков С.Д. Обеспечение механической безопасности железобетонных несущих конструкций на всех этапах жизненного цикла // Международный строительный конгресс. Наука. Инновации. Цели. Строительство : сб. тез. докл. 2023. С. 48–50. DOI: 10.37538/2949-219X-2023-48-50. EDN GGBZDR.

21. Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Терехов И.А., Шмаков С.Д. Классификация сооружений промышленных предприятий по возможности защиты от прогрессирующего обрушения // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2024. № 1 (47). С. 15–20. DOI: 10.52684/2312-3702-2024-47-1-15-20. EDN WPLTSL.

Поступила в редакцию 20 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 21 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 25 мая 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: Ашот Георгиевич Тамразян — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, член-корреспондент РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; Scopus: 55975413900; tamrazian@mail.ru;

Анатолий Викторович Алексейцев — доктор технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3035-5571, Scopus: 57191530761, ResearcherID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819; aalexw@mail.ru;

Елена Сергеевна Мишина — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; mishany96969@mail.ru.

Вклад авторов:

Тамразян А.Г. — концепция оценки живучести на основе вероятностного показателя.

Алексейцев А.В. — разработка методики оценки живучести на основе вероятностного показателя.

Мишина Е.С. — выполнение расчетов для различных аварийных ситуаций, получение и анализ результатов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Tamrazyan A.G. Conceptual approaches to robustness assessment of building structures, buildings and facilities. *Reinforced Concrete Structures*. 2023; 3(3):62-74. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.3.62-74. EDN IKRNWX. (rus.).
2. Kolchunov V.I., Iliushchenko T.A., Fedorova N.V., Savin S.Y., Tur V.V., Lizahub A.A.I. Structural robustness : an analytical review. *Building and Reconstruction*. 2024; 3(113):31-71. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-113-3-31-71. EDN FHLGWH. (rus.).
3. Tamrazyan A.G. Survivability as the degree of operability of structures in case of damage. *Industrial and Civil Engineering*. 2023; 7:22-28. DOI: 10.33622/0869-3019.2023.07.22-28. EDN DTAOGR. (rus.).
4. Kolchunov V.I., Savin S.Yu. Survivability criteria for reinforced concrete frame at loss of stability. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 4(80):73-80. DOI: 10.18720/MCE.80.7. EDN XYLDTF.
5. Lan X., Li Z., Fu F., Qian K. Robustness of steel braced frame to resist disproportionate collapse caused by corner column removal. *Journal of Building Engineering*. 2023; 69:106226. DOI: 10.1016/J.JOBE.2023.106226
6. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu., Amelina M.A. Probabilistic model of reinforced concrete frame failure in case of loss of stability. *Industrial and Civil Engineering*. 2024; 10:4-11. DOI: 10.33622/0869-7019.2024.10.04-11. EDN KYF-SCZ. (rus.).
7. Qu T., Zeng B., Zhou Z., Huang L., Chang D. Dynamic and uncertainty-based assessment of the progressive collapse probability of prestressed concrete frame structures with infill walls. *Structures*. 2024; 61:106105. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2024.106105
8. Ding L., Chen J., Caspele R. Determination of dynamic collapse limit states using the energy-based method for multi-story RC frames subjected to column removal scenarios. *Engineering Structures*. 2024; 311:118170. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.118170
9. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*. 2018; 173:122-149. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.082
10. Wang S., Cheng X., Li Y., Yang X., Zhang H., Guo R. et al. Assessing progressive collapse regions

of reinforced concrete frame structures using Graph Convolutional Networks. *Engineering Structures*. 2025; 322:119076. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.119076

11. Husain M., Yu J., Osman B.H., Ji J. Progressive collapse resistance of post-tensioned concrete beam-column assemblies under a middle column removal scenario. *Journal of Building Engineering*. 2021; 34:101945. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101945

12. Kasimov R.G., Skvortsova E.O. Progressive destruction and protection of stone buildings. *Traditions and innovations in construction and architecture. Construction : collection of articles*. 2019; 809-816. EDN JWROEE. (rus.).

13. Bessonov S.N., Solodov N.V. Survivability of spatial lattice structures made of “Kislovodsk” type pipes when calculating for progressive (avalanche) collapse. *Science-intensive technologies and innovations (XXV scientific readings) : collection of reports of the International scientific and practical conference*. 2023; 76-80. EDN PPBABI. (rus.).

14. Qian K., Weng Yu.H., Fu F., Deng X.F. Numerical evaluation of the reliability of using single-story substructures to study progressive collapse behaviour of multi-story RC frames. *Journal of Building Engineering*. 2021; 33:101636. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101636. EDN KMLTXW.

15. Praxedes C., Yuan X.-X. Robustness-oriented optimal design for reinforced concrete frames considering the large uncertainty of progressive collapse threats. *Structural Safety*. 2022; 94:102139. DOI: 10.1016/j.strusafe.2021.102139

16. Tamrazyan A.G., Tyagur D.V. On the influence of corrosion damage on the structural characteristics of bending reinforced concrete elements when determining survivability. *Safety of the construction*

*stock of Russia. Problems and solutions : proceedings of the International Academic Readings*. 2023; 156-162. EDN UTPYXZ. (rus.).

17. Kabancev O.V., Mitrovic B. For the selection of characteristics of limit states of monolithic reinforced concrete systems for the mode of progressive drop. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology*. 2018; 6(378):234-241. EDN TTXZYZ. (rus.).

18. Alekseytsev A.V., Antonov M.D. Resistance to progressive collapse of monolithic frames of buildings at localized damage of nodes from push-through. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2024; 19(9):1454-1468. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1454-1468. EDN KBUTDH. (rus.).

19. Serpik I.N., Kurchenko N.S., Alekseytsev A.V., Lagutina A.A. Analysis of the dynamic behavior of plane frames at emergency actions considering geometrical, material and structural nonlinearities. *Industrial and Civil Engineering*. 2012; 10:49-51. EDN PFGIFZ. (rus.).

20. Terekhov I.A., Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D. Ensuring the mechanical safety of reinforced concrete bearing structures at all stages of the life cycle. *International Construction Congress. Science. Innovations. Objectives. Construction : collection of abstracts of reports*. 2023; 48-50. DOI: 10.37538/2949-219X-2023-48-50. EDN GGBZDR. (rus.).

21. Trekin N.N., Kodysh E.N., Terekhov I.A., Shmakov S.D. Classification of structures of industrial enterprises according to the possibility of protection from progressive collapse. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2024; 1(47):15-20. DOI: 10.52684/2312-3702-2024-47-1-15-20. EDN WPLTSL. (rus.).

Received May 20, 2025.

Adopted in revised form on May 21, 2025.

Approved for publication on May 25, 2025.

**B I O N O T E S :** **Ashot G. Tamrazyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Scopus: 55975413900; tamrazian@mail.ru;

**Anatoly V. Alekseytsev** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3035-5571, Scopus: 57191530761, ResearcherID: I-3663-2017, ORCID: 0000-0002-4765-5819; aalexw@mail.ru;

**Elena S. Mishina** — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; mishany96969@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Ashot G. Tamrazyan — a probabilistic-based robustness assessment concept.*

*Anatoly V. Alekseytsev — development of a methodology for robustness assessment based on a probabilistic indicator.*

*Elena S. Mishina — performing calculations for various emergency situations, obtaining and analyzing results.*

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

## Численное моделирование железобетонных перекрытий из сборных плит по стальным балкам

Мария Петровна Бергер

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В современных многоэтажных зданиях, строящихся из различных материалов, все больше применяется стальной каркас, который обеспечивает гибкость планировочных решений и сокращает сроки строительства. Различные типы перекрытий, такие как монолитные железобетонные плиты и сборные многопустотные плиты, позволяют ускорить монтаж и повысить прочность конструкции, а также обеспечивают передачу горизонтальных нагрузок. Для оптимального проектирования перекрытий из сборных плит, особенно опирающихся на нижнюю полку стальных балок, необходимо использовать численное моделирование методом конечных элементов, чтобы точно учесть особенности работы конструкций и повысить их эффективность.

**Материалы и методы.** При формировании конечно-элементной модели использованы стержневые элементы для колонн и балок, а также конечные оболочечные элементы для плит перекрытия, что дает возможность точно моделировать их жесткость и поведение под нагрузками. Для учета особенностей работы сборных железобетонных плит рассмотрено несколько подходов: применение жестких вставок и триангуляция контура, а также создание шарниров с расшивкой узлов для моделирования соединений и совместной работы элементов. В расчетах использовались численные параметры жесткости и закрепления, а также учтены особенности опирания и эксцентриситетов, что повышает точность моделирования и позволяет оценить усилия и прогибы в конструкции.

**Результаты.** Определены максимальные вертикальные перемещения балок для обоих рассмотренных вариантов численного моделирования. Получены изгибающие моменты в балках и выполнено сравнение полученных значений для численного и теоретического расчетов.

**Выводы.** Численные исследования показали, что вариант с моделированием сборных железобетонных плит с помощью триангуляции контура (без использования жестких вставок) более точно отражает характер работы конструкции перекрытия. Усилия в балках, полученные при этом способе моделирования, оказываются больше, чем при использовании в модели жестких вставок.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сборные плиты, стальные балки, численный расчет, железобетонное перекрытие по стальным балкам

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Бергер М.П. Численное моделирование железобетонных перекрытий из сборных плит по стальным балкам // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 1072–1082. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1072-1082

Автор, ответственный за переписку: Мария Петровна Бергер, [bergermp@mgsu.ru](mailto:bergermp@mgsu.ru).

## Numerical modelling of concrete hollow-core slabs on steel beams

Maria P. Berger

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

### ABSTRACT

**Introduction.** In modern multi-story buildings constructed from various materials, steel frames are increasingly used, which provide flexibility in planning solutions and reduce construction time. Various types of floors, such as reinforced concrete slabs and precast hollow-core slabs, allow faster installation and increase structural strength, and ensure the transfer of horizontal loads. For optimal design of floors made of precast slabs, especially those supported by the bottom flange of steel beams, it is necessary to use numerical modelling using the finite element method to accurately account for the specific features of the structure and improve its efficiency.

**Materials and methods.** When forming the finite element model, rod elements for columns and beams, as well as finite shell elements for floor slabs, were used, which allows for accurate modelling of their rigidity and behavior under loads. Several approaches were considered to take into account the specific features of precast concrete slabs: the use of rigid rods and contour triangulation, as well as the creation of hinges with joint expansion to model connections and joint operation of elements. The calculations used numerical parameters of rigidity and fixation, and also took into account the features of support and eccentricities, which increases the accuracy of modelling and allows for the evaluation of forces and deflections in the structure.

**Results.** The maximum vertical displacements of beams for both considered variants of numerical modelling are determined. Bending moments in beams are obtained and a comparison of the obtained values for numerical and theoretical calculations is performed.

**Conclusions.** Numerical analysis has shown that modelling precast concrete slabs using contour triangulation (without using rigid rods) more accurately reflects the nature of the operation of the floor structure. The forces in the beams obtained with this modelling method are greater than when using rigid rods in the model.

**KEYWORDS:** hollow-core slabs, steel beams, numerical analysis, concrete floor on steel beams

**FOR CITATION:** Berger M.P. Numerical modelling of concrete hollow-core slabs on steel beams. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):1072-1082. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1072-1082 (rus.).

*Corresponding author:* Maria P. Berger, [bergermp@mgsu.ru](mailto:bergermp@mgsu.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

В современных городах основу застройки составляют многоэтажные здания. В России они традиционно строятся из кирпича, сборного или монолитного железобетона. В числе перспективных направлений в области строительства является возведение многоэтажных зданий на стальном каркасе [1–5]. Использование стальных конструкций обеспечивает гибкость объемно-планировочных решений, позволяет сократить срок строительства за счет использования унифицированных элементов заводского изготовления, повысить экологичность здания и др. Одним из важных аспектов компоновки каркаса здания служит выбор конструкции перекрытия. Тип перекрытия зависит от многих факторов, включая назначение здания, необходимую высоту этажа, требования к прочности, звукоизоляции, огнестойкости [6, 7]. К наиболее распространенным конструктивным решениям перекрытий по стальным балкам относятся:

- монолитная железобетонная плита по съемной опалубке;
- монолитная железобетонная плита по несъемной опалубке из профилированного настила;
- сборные многопустотные или ребристые плиты;
- сталежелезобетонное перекрытие.

В России широко используется модульная система при назначении размеров здания [8, 9]. Несмотря на разнообразие конструктивных решений перекрытий зданий со стальным каркасом, при назначении расстояний между осями колонн и балок следует учитывать требования модульной системы и делать эти размеры кратно укрупненным модулям 300 или 600 мм.

В любом случае при устройстве перекрытия необходимо обеспечить формирование жесткого диска перекрытия, что создает условия для обеспечения жесткости и устойчивости здания в целом. Жесткий диск перекрытия обеспечивает передачу горизонтальных воздействий на вертикальные связи или ядра жесткости, и тем самым создаются условия для нормальной работы колонн, не входящих в связевые блоки.

Жесткий диск перекрытия при устройстве монолитной железобетонной плиты по съемной опалубке или по несъемной опалубке из профилированного настила формируется за счет анкеровки монолитной плиты к балкам. Преимущество использования профилированного настила в качестве несъем-

ной опалубки — отсутствие временных монтажных опор, что дает возможность сократить срок возведения здания. При устройстве плиты перекрытия по нижней полке двутавровой балки на восприятие вертикальной нагрузки плита перекрытия и стальные балки работают раздельно. Особенности совместной работы стальных балок и монолитных плит перекрытий рассмотрены в ряде работ [10]. Если плита располагается над верхней полкой балки, а анкеры обеспечивают восприятие сдвигающих усилий между плитой и балкой, то образуется сталежелезобетонная система. Преимущество сталежелезобетонной конструкции заключается в более высокой несущей способности и жесткости перекрытия [11].

Применение сборных многопустотных плит позволяет ускорить монтаж здания. В то же время не нужны второстепенные балки, однако в районе колонн стоит предусматривать монолитные участки. После замоноличивания стыков плиты образуют горизонтальный жесткий диск, таким образом обеспечивая совместную работу несущих конструкций каркаса. При этом в зависимости от расположения сборных плит (на нижней или верхней полке двутавровой балки) и способа анкерования плиты могут работать на вертикальную нагрузку независимо от стальных балок или сформировать сталежелезобетонную конструкцию [12]. Сталежелезобетонная система с применением сборных пустотных плит обладает более высокой прочностью и жесткостью [13]. Для уменьшения строительной высоты перекрытия пустотные плиты возможно опирать на нижние полки балок. В этом случае необходимо использование несимметричных сварных двутавров или прокатных двутавров, у которых к нижней полке приварена более широкая, чем полка, стальная пластина. Особенности совместной работы сталежелезобетонных перекрытий из сборных железобетонных плит со стальными балками исследованы в трудах [14–16].

Сталежелезобетонная конструкция с применением сборных плит позволяет уменьшить сечение балок и сократить расход стали на перекрытие, но при этом высота перекрытия складывается из суммарной высоты балок и плиты перекрытия. ОпираНИЕ сборных плит на нижнюю полку ведет к некоторому росту металлоемкости балок, но дает возможность ограничить высоту перекрытия высотой балки. Нагрузка при этом в основном передает-

ся на балки в направлении пролета плиты. Однако после замоноличивания стыка и формирования горизонтального диска перекрытия нагрузка частично передается и на балки, параллельные пролету плит.

При проектировании зданий с перекрытиями из сборных пустотных плит используются вычислительные комплексы, реализующие метод конечных элементов. Численное моделирование, отражающее особенности работы перекрытий из сборных плит, опертых на нижнюю полку, представляет значительный научный и практический интерес. В статье рассмотрены рекомендации численного моделирования перекрытия из сборных плит, опирающихся на нижнюю полку стальной балки.

Цель исследования — поиск наиболее оптимального варианта численного моделирования, корректно отображающего включение в работу стальных балок.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта, на примере расчета которого отработаны методы формирования конечно-элементной модели, рассмотрено 17-этажное здание. На рис. 1 представлен план типового этажа здания.

Основным планировочным компонентом данного здания является ячейка размерами в плане  $6,8 \times 4,3$  м. По углам ячейки расположены колонны, по контуру балки. Каркас связевой, опирание балок на колонны

принято шарнирным, связи в основном находятся в центре здания, ряд из них размещен у продольных стен. Колонны имеют двутавровое сечение. Балки, на которые опираются плиты перекрытий, устроены вдоль цифровых осей, сварные, сечение — несимметричный двутавр с более широкой нижней полкой. Балки, расположенные вдоль буквенных осей, — сварные, сечение — симметричный двутавр. Класс прочности стали для балок и колонн принят С355.

На балки пролетом 4,3 м опираются сборные многпустотные железобетонные плиты ПК-66-12, выполненные по ГОСТ 9561–91. Плиты имеют толщину 220 мм, пролет — 6,6 м, ширина одной плиты — 1,2 м. Пролет плит 6,6 м выбран с учетом возможности монтажа плит между балок. Класс бетона плит и монолитных участков В20. После монтажа плит выполнялось замоноличивание стыков между плитами и устраивались монолитные участки шириной 350 мм у продольных балок.

Схема расположения элементов перекрытия приведена на рис. 2.

Расчетная модель разрабатывалась в ПК ЛИРА-САПР 2022. Балки и колонны моделировались стержневыми элементами, плиты перекрытий — конечными элементами оболочки. Жесткость плиты перекрытия была определена по приведенной толщине и составляет 110 мм. Модуль упругости бетона принимался длительный в соответствии

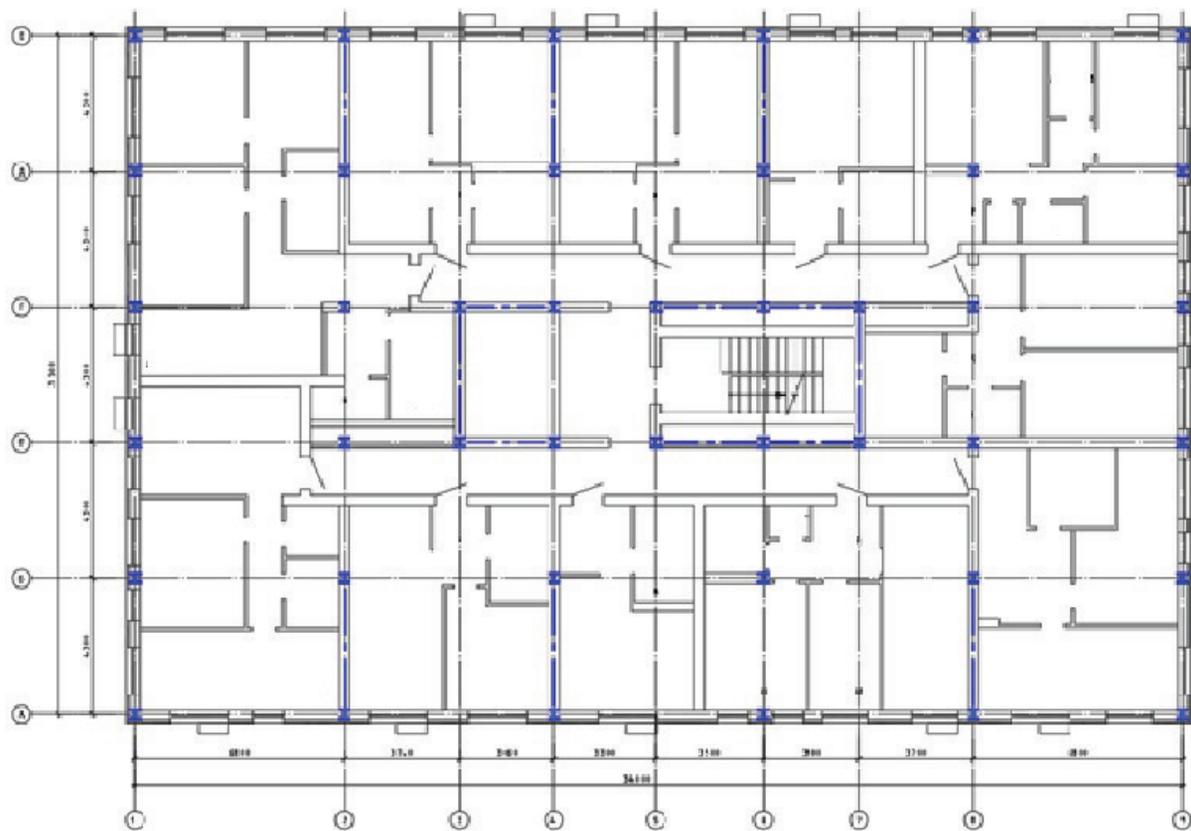


Рис. 1. План типового этажа здания

Fig. 1. Typical floor plan of the building

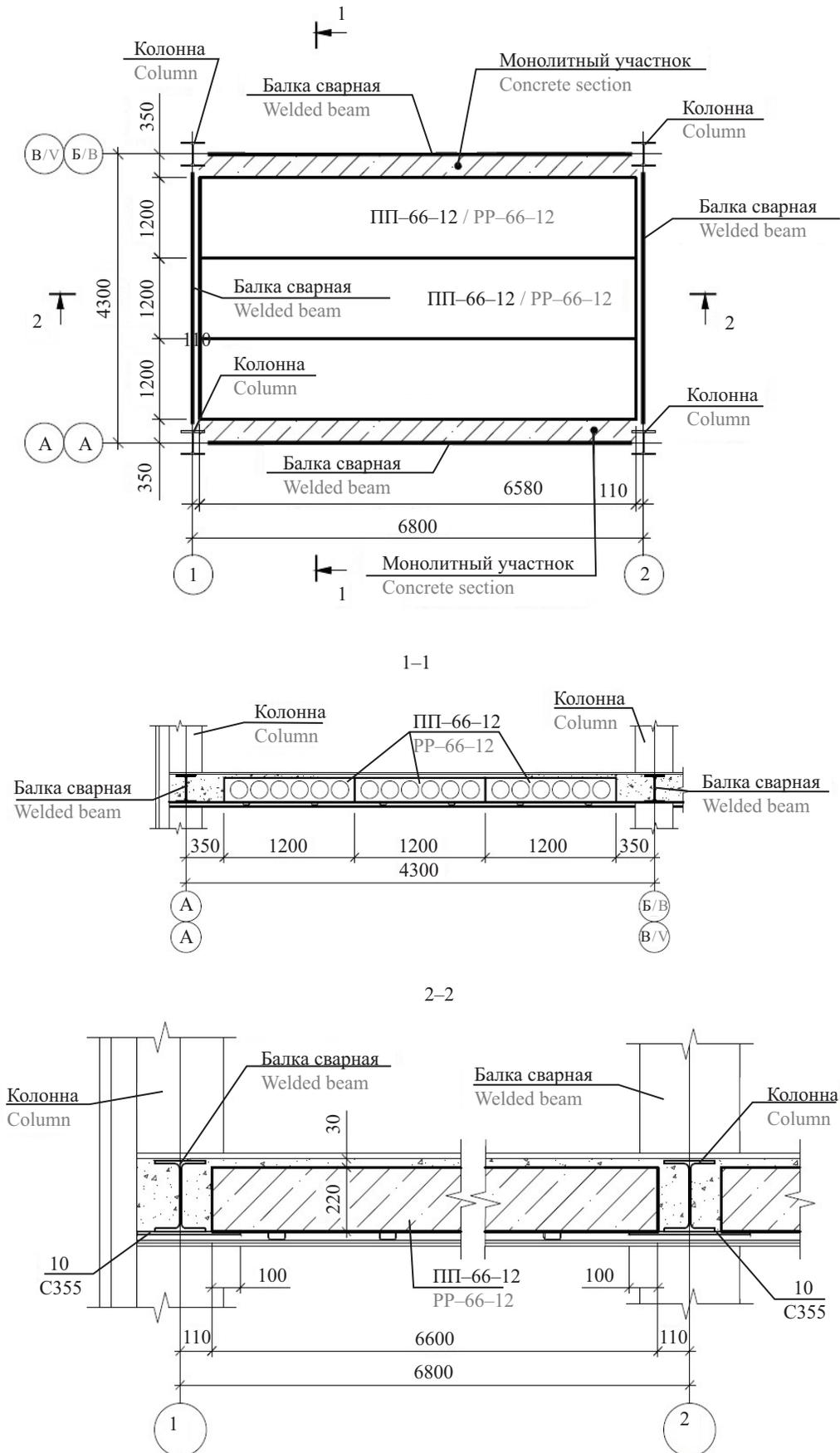


Рис. 2. Схема расположения элементов перекрытия

Fig. 2. Layout of the floor elements

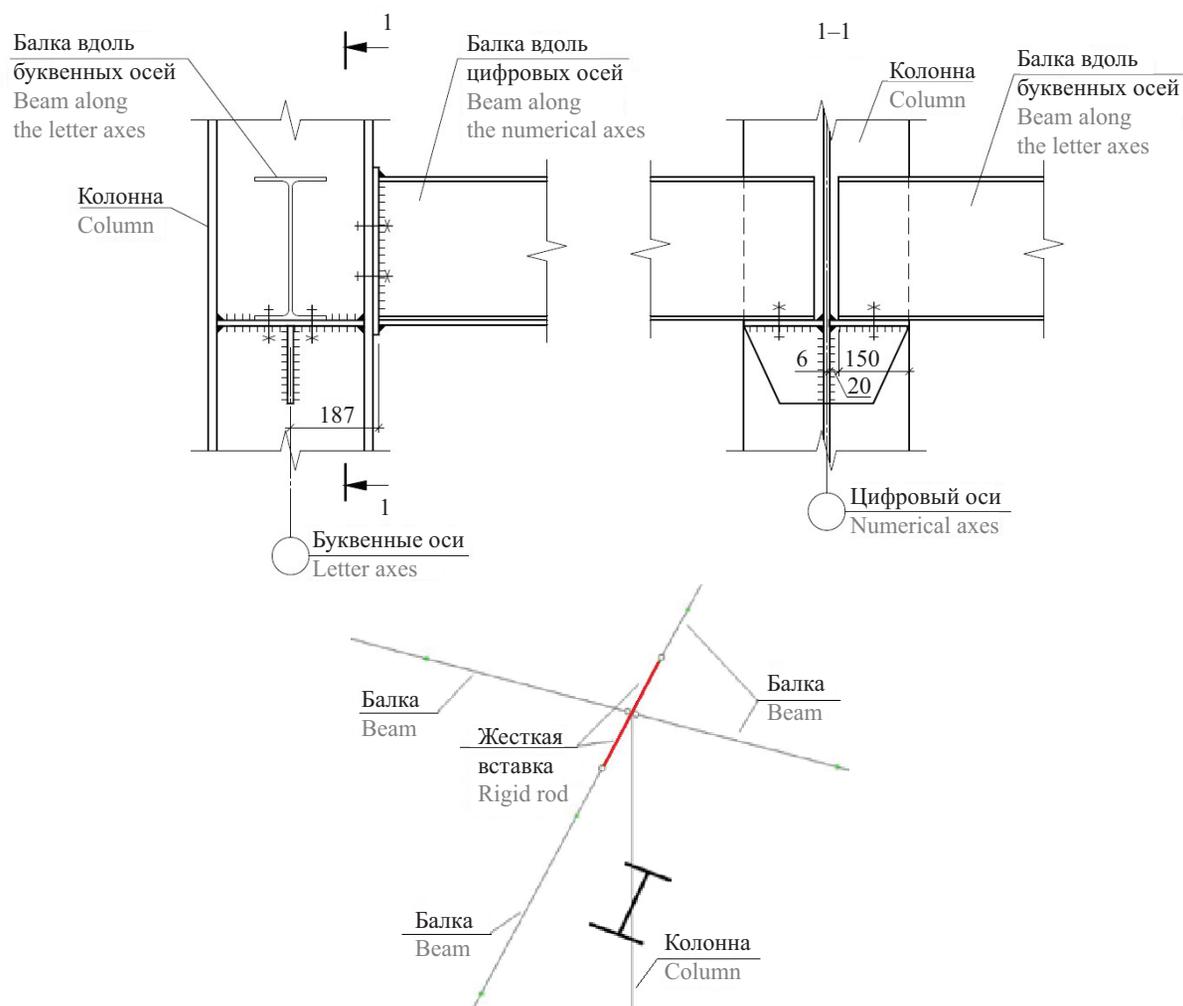


Рис. 3. Фрагмент расчетной модели в месте опирания балок на колонну

Fig. 3. Fragment of the numerical model at the beam to column connection

с п. 6.1.15 СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции». При разработке расчетной модели дополнительной жесткой вставкой был учтен эксцентриситет опирания балки пролетом 4,3 м на полку колонны (рис. 3).

Перед формированием пространственной конечно-элементной схемы всего здания исследовано влияние особенностей моделирования сборных железобетонных плит перекрытия на усилия и прогибы балок. Для этого выполнены тестовые расчеты только перекрытия без включения в работу колонн. Рассмотрено два варианта моделирования перекрытия:

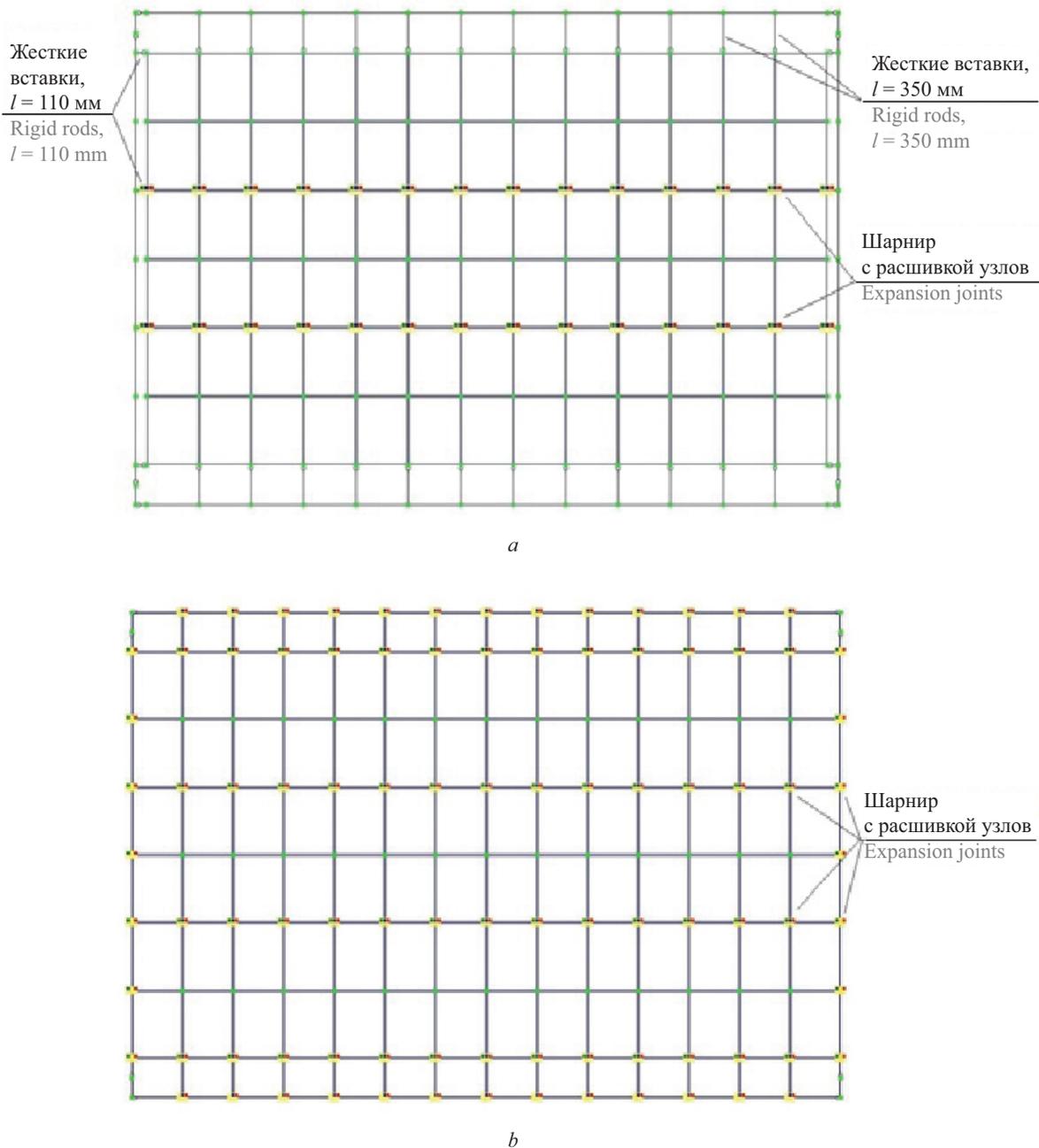
- использование жестких вставок для моделирования монолитных участков и эксцентриситета опирания плит на стальную балку (рис. 4, а);
- триангуляция контура перекрытия на всей ячейке (рис. 4, б).

Жесткий диск перекрытия раскрепляет балки из плоскости и препятствует возникновению кручения. Однако в расчетной схеме на крайних балках, на которые плиты опираются только по одной стороне, могут возникать крутящие моменты. Поэтому рекомендуется установить связи на углы поворота

относительно соответствующих глобальных осей. Балки, расположенные вдоль оси  $Y$ , следует закрепить от поворота вокруг оси  $Y$ ; балки, расположенные вдоль оси  $X$ , — закрепить от поворота вокруг оси  $X$ .

Особенности совместной работы стальных балок с конструкциями перекрытия удобно реализовать в расчетной модели с помощью команды «создание шарнира с расшивкой узлов». В первом варианте в местах стыка плит друг с другом были введены шарниры, обеспечивающие одинаковые линейные перемещения по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . При этом жесткие вставки крепятся жестко к стальным балкам и шарнирно к плитам. Жесткость вставок задана численно. Значение продольной жесткости принято  $EA = 1\ 000\ 000$  кН, изгибная жесткость в вертикальной и горизонтальной плоскостях —  $EI = 1\ 000\ 000$  кН·м<sup>2</sup>.

Для второго варианта предусматривалось обеспечение одинаковых линейных перемещений по трем осям ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) на границах между плитами и в местах стыка плит с продольными монолитными участками. В местах контакта плит и монолитных участков с балками для смежных узлов обеспечи-



**Рис. 4.** Расчетная модель перекрытия: *a* — с использованием жестких вставок; *b* — с триангуляцией контура по всей ячейке

**Fig. 4.** Numerical model of the floor: *a* — using rigid rods; *b* — with triangulation over the entire floor

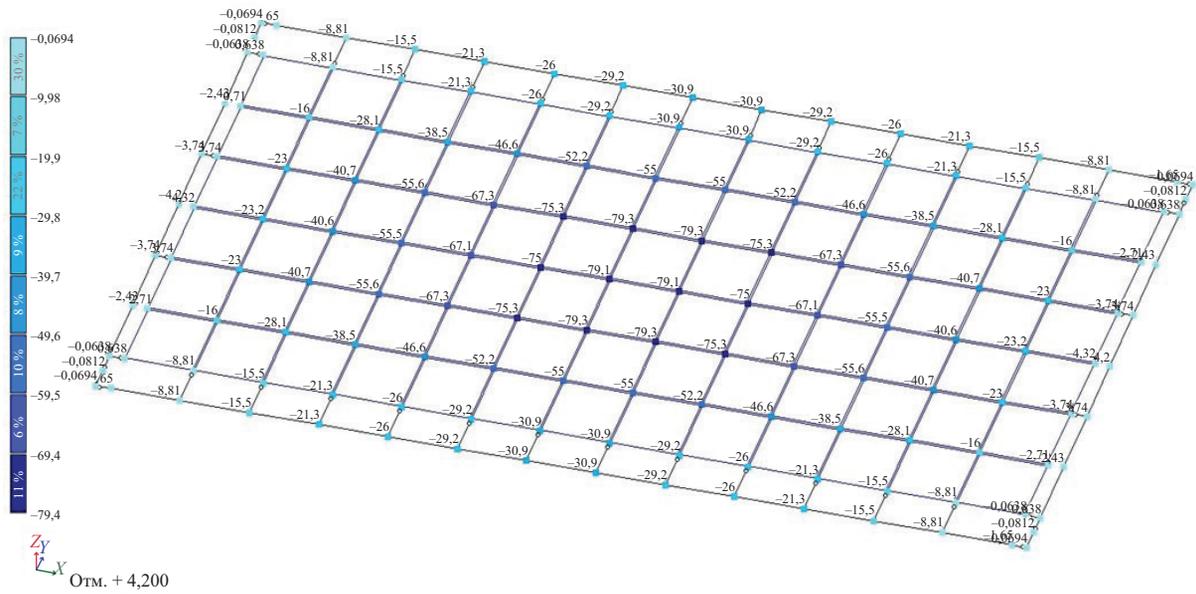
ваются одинаковые линейные перемещения по осям  $Z$  и  $X$  (для балок, расположенных вдоль цифровых осей) и по осям  $Z$  и  $Y$  (для балок, расположенных вдоль буквенных осей).

Расчетное значение нагрузки, действующей на перекрытие с учетом веса перекрытия, составляет 10 кПа.

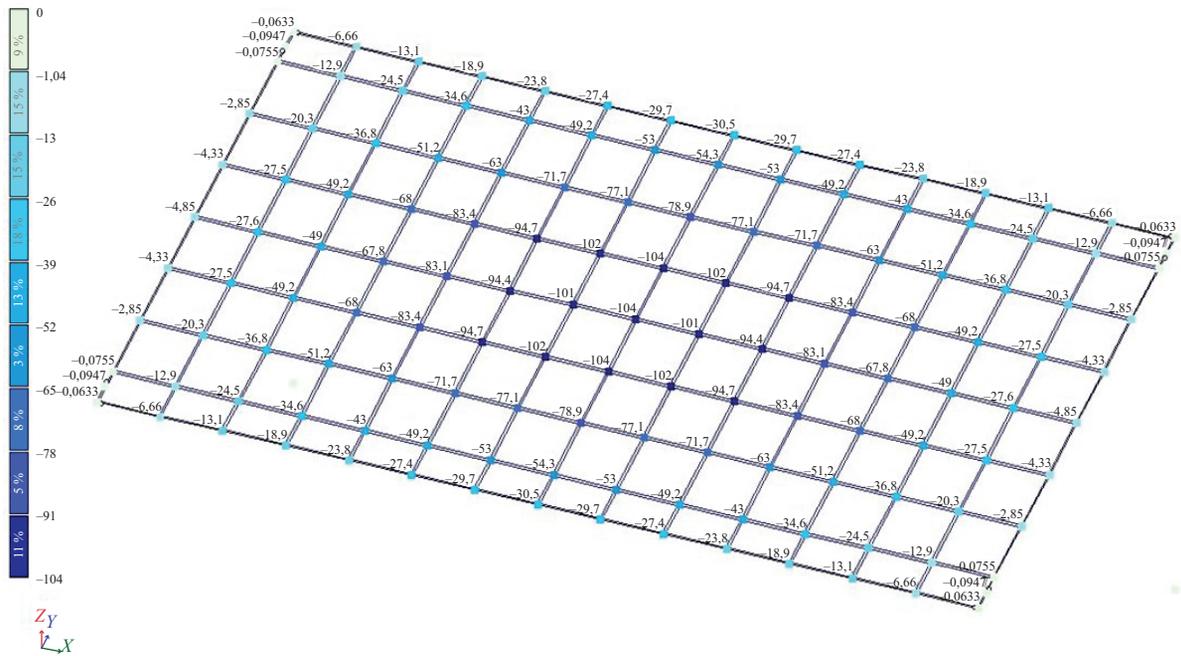
## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно принятому конструктивному решению, сборные многопустотные плиты опираются

на нижнюю полку стальных балок без использования специальных анкерных креплений, что делает возможным сдвиг плит в горизонтальном направлении вдоль продольных осей балок. Таким образом, при работе на изгиб балка и плита не образуют сталежелезобетонной конструкции. Кроме этого, в стыках плит, в швах примыкания плит к монолитным участкам и швах между балками, плитами и монолитными участками не передаются изгибающие моменты. После замоноличивания стыков и устройства продольных монолитных участков ис-



a



b

Рис. 5. Вертикальные перемещения: *a* — расчетная модель с жесткими вставками, мм; *b* — расчетная модель без жестких вставок, мм

Fig. 5. Vertical displacements: *a* — numerical model with rigid rods, mm; *b* — numerical model without rigid rods, mm

ключаются взаимные линейные перемещения в горизонтальном направлении, перпендикулярном оси балки, а также кручение балок относительно продольных осей.

На рис. 5 показаны прогибы перекрытия, а на рис. 6 — изгибающие моменты в балках для двух вариантов расчетной схемы.

В таблице представлены прогибы и изгибающие моменты в балках для двух вариантов расчетной схемы.

В таблице, кроме определенных численным расчетом изгибающих моментов, представлены теоретические значения этих усилий. Теоретические усилия определены в предположении, что именно балки пролетом 4,3 м, на которые и опираются эти плиты, будут воспринимать практически всю нагрузку, действующую на перекрытие. При этом балки, параллельные плитам, должны работать только на нагрузку с монолитных участков. Теоретические значения моментов установлены как в шарнирно опертых балках, загру-

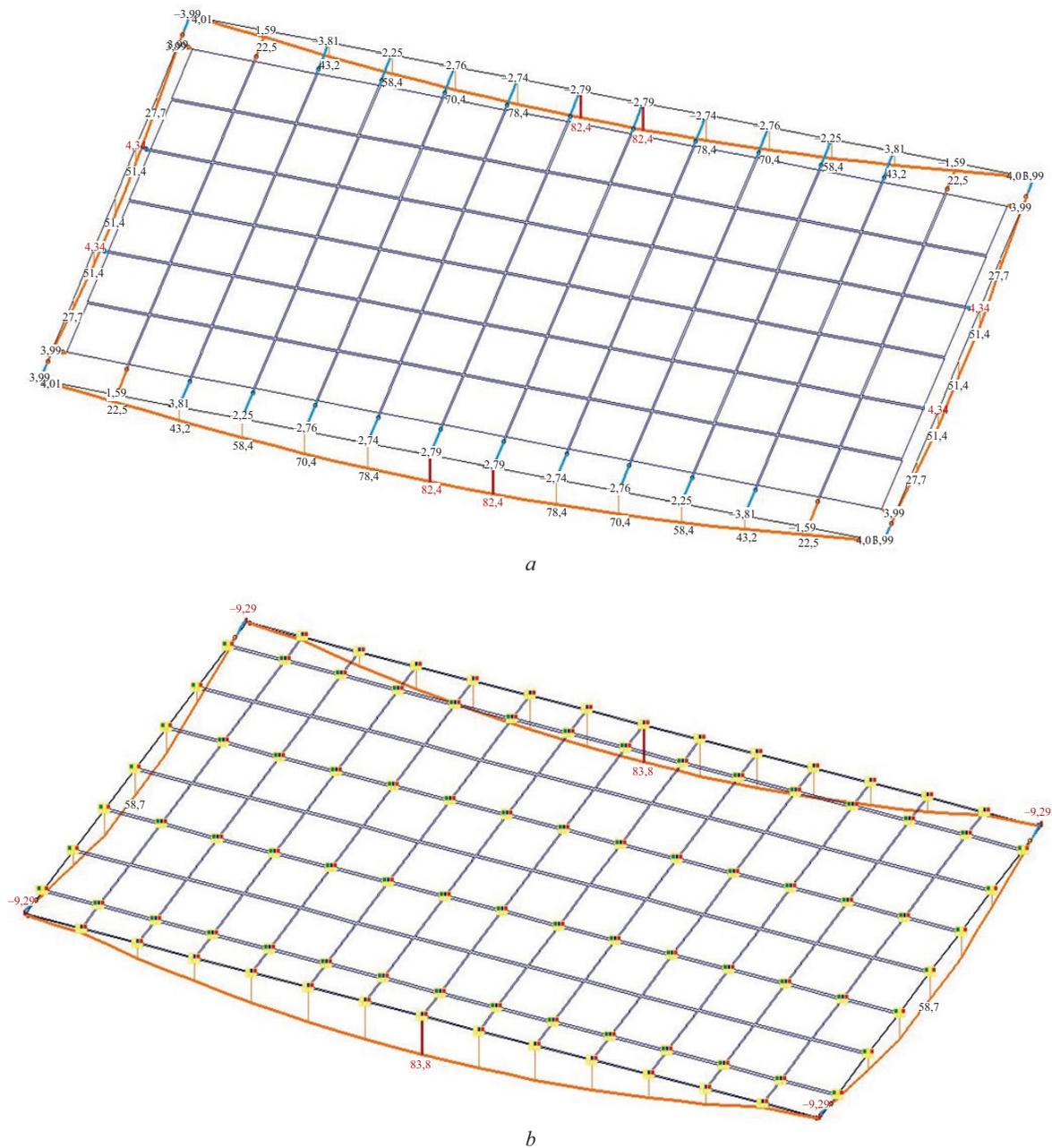


Рис. 6. Эпюра изгибающих моментов: *a* — расчетная модель с жесткими вставками, кН·м; *b* — расчетная модель без жестких вставок, кН·м

Fig. 6. Bending moment diagram: *a* — numerical model with rigid rods, kN·m; *b* — calculation model without rigid inserts, kN·m

Прогибы и перемещения балок перекрытия

Deflections and displacements of floor beams

Вариант Version	Прогибы балок, мм Vertical displacements of beams, mm		Изгибающие моменты в балках, кН·м Bending moments of beams, kN·m			
	Пролет 4,3 м Span 4.3 m	Пролет 6,8 м Span 6.8 m	Пролет 4,3 м Span 4.3 m		Пролет 6,8 м Span 6.8 m	
			Метод конечных элементов Finite element method	Теория Theory	Метод конечных элементов Finite element method	Теория Theory
1	4,2	30,9	51,4	55,1	82,4	20,2
2	4,85	30,5	58,7	55,1	83,8	20,2

женных равномерно распределенной нагрузкой. Нагрузка на балки определена следующим образом:

- для балок пролетом 4,3 м:  $2,15 \cdot 10 = 21,5$  кН/м;
- для балок пролетом 6,8 м:  $0,35 \cdot 10 = 3,5$  кН/м.

Прогибы балок и изгибающие моменты в них по рассмотренным вариантам моделирования при пролете балок 4,3 м отличались друг от друга до 13 %, при пролете 6,8 м до 2 %. При этом большие значения прогибов и моментов получены при втором варианте моделирования.

Надо отметить, что прогибы балок и усилия в них отличались от теоретических значений. Проведенными расчетами установлено, что балки пролетом 4,3 м действительно воспринимают значительную часть нагрузки, действующей на плиты. Максимальный момент в этих балках при первом варианте моделирования оказался меньше теоретического на 7 %, при втором варианте больше теоретического на 6 %. Заметно отличались теоретические и численные моменты в балках пролетом 6,8 м, расположенных параллельно плитам. Оказалось, что на них распределяется существенно большая часть нагрузки с перекрытия, чем представлялось теоретически. Это привело к появлению в балках пролетом 6,8 м моментов, превышающих теоретические до 4,1 раза. Моменты в балках пролетом 6,8 м по второму варианту моделирования оказались больше, чем по первому варианту на 2 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании результатов расчета двух вариантов численного моделирования перекрытия из сборных плит, опирающихся на нижние полки стальных балок, можно сформулировать следующие выводы.

Моделирование с использованием жестких вставок усложняет приложение нагрузки в модели. Требуется отдельно собирать нагрузку с монолитных участков и прикладывать ее в виде погонной нагрузки к продольным балкам. Вариант с триангуляцией контура по всей площади перекрытия является более оптимальным с точки зрения численного моделирования.

Значения усилий, полученные при втором варианте моделирования, оказываются немного больше по сравнению с первым вариантом, что идет в запас несущей способности.

Теоретические представления о том, что при использовании сборных плит нагрузка передается только на балки, на которые опираются плиты, и при отсутствии нагрузки от плит — на параллельно расположенные балки, неверны. Необходимо более точно включать в совместную работу все несущие элементы перекрытия при формировании конечно-элементных моделей.

Для практических расчетов рекомендуется использовать второй вариант моделирования, более точно отражающий характер включения в совместную со стальными балками работу сборных железобетонных плит перекрытия.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Lawson R.M., Ogden R.J., Rackham J.W.* Steel in multi-storey residential buildings. Steel Construction Institute, 2004. 68 p.
2. *Туснин А.Р., Варакин П.А.* Типовой стальной каркас пятиэтажного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 10. С. 45–49. EDN SKGHNZ.
3. *Карасев Д.О., Шитилова Н.А., Арутюнян М.С.* Малоэтажное строительство. Виды строительных материалов для возведения зданий // Интернет-журнал Науковедение. 2016. Т. 8. № 3 (34). С. 121. EDN WIRKDJ.
4. *Сазонова Т.В., Казаков Д.С.* Малоэтажное строительство. Проблемы и решения // Вестник УГУЭС. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. 2014. № 1 (7). С. 194–198. EDN SJNAPJ.
5. *Павлов А.Б., Айрумян Э.Л., Камынин С.В., Каменщиков Н.И.* Быстровозводимые малоэтажные жилые здания с применением легких стальных тонкостенных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 9. С. 51–53. EDN HVAZXX.
6. *Туснин А.Р.* Перекрытия многоэтажных зданий со стальным каркасом // Промышленное и гражданское

строительство. 2015. № 8. С. 10–14. EDN SGGTOM.

7. *Туснин А.Р.* Облегченные перекрытия многоэтажных зданий со стальным каркасом // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 10. С. 99–103. EDN WWMTNV.

8. *Конструкции гражданских зданий / под ред. М.С. Туполева.* М. : Архитектура-С, 2007. 239 с. EDN OWONHR.

9. *Соловьёв А.К., Туснина В.М.* Архитектура зданий : учебник. М. : Академия, 2014. 334 с.

10. *Трофимов Д.С., Суходолов М.В.* Исследование численной модели монолитного перекрытия по металлическим балкам в ПК Ansys // Молодой ученый. 2022. № 21 (416). С. 70–73. EDN TRYJMQ.

11. *Pari M., Van de Graaf A.V., Hendriks M.A.N., Rots J.G.* A multi-surface interface model for sequentially linear methods to analyse masonry structures // Engineering Structures. 2021. Vol. 238. P. 112123. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112123

12. *Туснин А.Р., Коляго А.А.* Конструкция и работа сталежелезобетонного перекрытия с использованием сборных пустотных железобетонных плит // Современная наука и инновации. 2016. № 3 (15). С. 141–147. EDN YPKUYB.

13. Конин Д.В. Напряжения и сдвиг сталежелезобетонных перекрытий со сборными элементами и стальными балками // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 4. С. 98–115. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-98-115. EDN RFDPNF.

14. Way A.G.J., Cosgrove T.C., Brettle M.E. Precast concrete floors in steel framed buildings. Steel Construction Institute, 2007. 101 p.

15. Lam D. Designing composite beams with precast hollowcore slabs to Eurocode 4 // Advanced Steel Construction. 2007. Vol. 3. Issue 2. Pp. 594–606. DOI: 10.18057/IJASC.2007.3.2.5

16. Alqawzai S., Chen K., Shen L., Ding M., Yang B., Elchalakani M. Load-Bearing Capacity of Steel Beams with Precast Concrete Slabs: Numerical and Experimental Study // Journal of Constructional Steel Research. 2020. Vol. 170. P. 106115. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106115

Поступила в редакцию 22 мая 2025 г.

Принята в доработанном виде 24 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 29 мая 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Мария Петровна Бергер** — кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 927136, Scopus: 57192100982, ResearcherID: AAG-2520-2022, ORCID: 0000-0001-8906-9298; bergermp@mgsu.ru.

## REFERENCES

1. Lawson R.M., Ogden R.J., Rackham J.W. *Steel in multi-storey residential buildings*. Steel Construction Institute, 2004; 68.

2. Tusnin A.R., Varaksin P.A. Standard steel frame of a 5-story building. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 10:45-49. EDN SKGHNZ. (rus.).

3. Karasev D.O., Shipilova N.A., Arutunyan M.S. Low-rise construction. Types of structural materials for construction of buildings. *Naukovedenie*. 2016; 8(3):(34):121. EDN WIRKDJ. (rus.).

4. Sazonova T.V., Kazakov D.S. Low-rise construction. Problems and solutions. *Bulletin of UGUES. Science. Education. Economics. Series: Economics*. 2014; 1(7):194-198. EDN SJNAPJ. (rus.).

5. Pavlov A.B., Airumyan E.L., Kamynin S.V., Kamenshikov N.I. Fast erection of low-rise residential buildings making use of light-weight steel thin-walled structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2006; 9:51-53. EDN HVAZXX. (rus.).

6. Tusnin A.R. Floors of multi-storey buildings with steel frames. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 8:10-14. EDN SGGTOM. (rus.).

7. Tusnin A.R. Lightweight slabs of multistory buildings with a steel frame. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 10:99-103. EDN WWMTNV. (rus.).

8. *Civil Building Structures* / edited by Tupoleva M.S. Moscow, Architecture-S, 2007; 240. EDN OWONHR. (rus.).

9. Solovyov A.K., Tusnina V.M. *Architecture of Buildings : textbook*. Moscow, Academy, 2014; 334. (rus.).

10. Trofimov D.S., Sukhodolov M.V. Numerical Model Study of Monolithic Floor on Steel Beams in Ansys. *Young Scientist*. 2022; 21(416):70-73. EDN TRYJMQ. (rus.).

11. Pari M., Van de Graaf A.V., Hendriks M.A.N., Rots J.G. A multi-surface interface model for sequentially linear methods to analyse masonry structures. *Engineering Structures*. 2021; 238:112123. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112123

12. Tusnin A.R., Kolyago A.A. The construction and operation of the composite beams using the prefabricated reinforced concrete slab hollow core. *Modern Science and Innovations*. 2016; 3(15):141-147. EDN YPKUYB. (rus.).

13. Konin D.V. Stress and shear of steel reinforced floors with prefabricated units and steel beams. *Journal of Construction and Architecture*. 2023; 25(4):98-115. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-4-98-115. EDN RFDPNF. (rus.).

14. Way A.G.J., Cosgrove T.C., Brettle M.E. *Precast concrete floors in steel framed buildings*. Steel Construction Institute, 2007; 101.

15. Lam D. Designing composite beams with precast hollowcore slabs to Eurocode 4. *Advanced Steel Construction*. 2007; 3(2):594-606. DOI: 10.18057/IJASC.2007.3.2.5

16. Alqawzai S., Chen K., Shen L., Ding M., Yang B., Elchalakani M. Load-Bearing Capacity of Steel Beams with Precast Concrete Slabs: Numerical and Experimental Study. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020; 170:106115. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106115

*Received May 22, 2025.*

*Adopted in revised form on May 24, 2025.*

*Approved for publication on May 29, 2025.*

**BI O N O T E S :** **Maria P. Berger** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal and Wooden Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 927136, Scopus: 57192100982, ResearcherID: AAG-2520-2022, ORCID: 0000-0001-8906-9298; [bergermp@mgsu.ru](mailto:bergermp@mgsu.ru).

# ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.131

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1083-1094

## Сравнительный анализ методов расчетов фундаментов на просадочных грунтах

Надежда Сергеевна Никитина<sup>1</sup>, Данила Александрович Кравченко<sup>2</sup>,  
Надежда Вячеславовна Ремизова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*

<sup>2</sup> *Сервис карьерных машин (СКМ); г. Москва, Россия;*

<sup>3</sup> *Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); г. Санкт-Петербург, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проектирование свайных фундаментов на просадочных (лёссовых) грунтах представляет одну из наиболее актуальных задач в геотехнике. Широкое распространение таких грунтов и их высокая чувствительность к увлажнению создают риски значительных осадков и деформаций зданий. В связи с этим важно использование современных расчетных методов и моделей, которые позволяют более точно прогнозировать поведение оснований при различных эксплуатационных условиях.

**Материалы и методы.** Для анализа несущей способности свайных фундаментов применены два подхода: расчеты по нормативной документации и численное моделирование в программном комплексе PLAXIS 2D. В качестве расчетной модели грунта выбрана Hardening Soil, учитывающая упругие и пластические свойства, а также влияние замачивания и уплотнения. Моделировались буронабивные сваи с уширенной пятой, что дает возможность более реалистично оценивать взаимодействие свай с грунтом.

**Результаты.** Численные расчеты показали, что при замачивании грунтов максимальная осадка увеличивается с 6,38 до 14,58 см, а при учете собственного веса грунта — до 15,21 см, что приближается к предельно допустимым значениям по СП 22.13330.2016. Использование свай с уширением позволило добиться более равномерного распределения нагрузок и уменьшения деформаций. Дополнительно рассмотрены методы снижения просадочности, включая предварительное замачивание, упрочнение грунтов и дренажные мероприятия.

**Выводы.** Результаты моделирования подтвердили эффективность применения модели Hardening Soil для анализа осадков на просадочных грунтах. Использование буронабивных свай с уширенной пятой и инженерных мероприятий по упрочнению основания способствуют уменьшению осадков до нормативных значений, обеспечивая надежность и долговечность сооружений. Исследование подчеркивает актуальность комплексного подхода при проектировании фундаментов на сложных грунтах.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** просадочные грунты, моделирование осадки, PLAXIS 2D, модель Hardening Soil, модель Soft Soil, модель Мора – Кулона, свайные фундаменты, сваи с уширением фундаменты

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Никитина Н.С., Кравченко Д.А., Ремизова Н.В. Сравнительный анализ методов расчетов фундаментов на просадочных грунтах // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 1083–1094. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1083-1094

Автор, ответственный за переписку: Надежда Вячеславовна Ремизова, nadevya@yandex.ru.

## Comparative analysis of methods of calculation of foundations on subsidence soils

Nadezhda S. Nikitina<sup>1</sup>, Danila A. Kravchenko<sup>2</sup>, Nadezhda V. Remizova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;*

<sup>2</sup> *Quarry Machine Service; Moscow, Russian Federation;*

<sup>3</sup> *Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU); Saint Petersburg, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** Design of pile foundations on subsidence (loess) soils is one of the most urgent tasks in geotechnics. The widespread use of such soils and their high sensitivity to moistening create risks of significant settlements and defor-

mations of buildings. In this regard, it is important to use modern calculation methods and models that allow more accurate prediction of the behaviour of foundations under different operating conditions.

**Materials and methods.** Two approaches were used to analyze the bearing capacity of pile foundations: calculations according to the normative documentation and numerical modelling in the PLAXIS 2D software package. Hardening Soil was chosen as the design soil model, which takes into account elastic and plastic properties, as well as the influence of soaking and compaction. The bored piles with a widened heel were modelled, which allows for a more realistic assessment of the interaction between the piles and the soil.

**Results.** Numerical calculations showed that when soils are soaked, the maximum settlement increases from 6.38 to 14.58 cm, and when taking into account the soil's own weight — up to 15.21 cm, which is close to the maximum permissible values according to SP22.13330.2016. The use of widened piles made it possible to achieve a more uniform distribution of loads and reduce deformations. In addition, methods for reducing subsidence are considered, including preliminary soaking, soil strengthening and drainage measures.

**Conclusions.** The simulation results confirmed the effectiveness of the Hardening Soil model for analyzing settlements on subsidence soils. The use of bored piles with a widened heel and engineering measures to strengthen the foundation helps to reduce settlements to standard values, ensuring the reliability and durability of structures. The work emphasizes the importance of an integrated approach to the design of foundations on complex soils.

**KEYWORDS:** subsidence soils, settlement modelling, PLAXIS 2D, Hardening Soil model, Soft Soil model, Mohr – Coulomb model, pile foundations with expansion

**FOR CITATION:** Nikitina N.S., Kravchenko D.A., Remizova N.V. Comparative analysis of methods of calculation of foundations on subsidence soils. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):1083-1094. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1083-1094 (rus.).

*Corresponding author:* Nadezhda V. Remizova, nadevya@yandex.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Вопрос проектирования фундаментов в условиях просадочных (лёссовых) грунтов является актуальным, учитывая большое распространение таких грунтов, они занимают примерно 17 % территории Российской Федерации. Проблематика расчетов и математического моделирования активно обсуждается и за рубежом [1–5]. Неоднородность осадков фундаментов при строительстве на просадочных грунтах, а также их чувствительность к увлажнению вызывают трудности при математическом моделировании, что дает широкое поле для развития и совершенствования работы расчетчика в программных комплексах.

На рис. 1 проиллюстрированы сведения о распространении лёссовых грунтов в России [6–11].

Затраты на устройство фундаментов обычно составляют от 10 до 20 % общей стоимости строительства, однако в условиях сложных грунтов, таких как просадочные, эти расходы могут увеличиваться до 15–25 %. Это, в свою очередь, влечет за собой рост стоимости конечного строительного продукта. Оценка геологических условий строительной площадки и тщательное проектирование фундамента позволяют существенно сократить расходы и снизить итоговую стоимость здания или сооружения.

Принимая во внимание распространенность лёссовых грунтов, важна разработка эффективных технологий устройства фундаментов на таких основаниях. Указанная тематика стала предметом исследований ряда отечественных ученых, таких как Ю.М. Абелев,

Источник информации: Инженерно-геологическая карта Российской Федерации, ФГУП «ВСЕГИНГЕО», 2010 г.

Ответственный исполнитель: С.Н. Чепрыгина

Source of information: Engineering geogical map of the territory of the Russian Federation, FSA "VSEGIN GEO", 2010

Responsible executive: S.N. Cheprygina



Рис. 1. Карта распространности просадочных грунтов на территории Российской Федерации [1]

Fig. 1. Map of the prevalence of subsidence soils on the territory of the Russian Federation [1]

М.Ю. Абелев, А.М. Абелева, И.В. Аверин, Д.Ю. Чунюк и др. [12–22].

Сравнительный анализ осадок различных типов фундаментов, применяемых на лёссовых грунтах, представляет интерес как для практического, так и теоретического подхода. В настоящей статье приведены результаты компьютерного моделирования, в которых проанализированы осадки фундаментов, выполненных с использованием буронабивных свай с уширенной пятой, в сравнении с данными по существующим зданиям. Такие расчеты позволяют выявить оптимальные технологические решения для возведения фундаментов в просадочных грунтах [23–25].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методы возведения фундаментов на просадочных грунтах требуют особого подхода из-за специфических физических и механических свойств таких грунтов, которые делятся в основном на три основных типа:

*1. Прорезание толщи просадочного грунта сваями.*

Часто при строительстве на просадочных (лёссовых) грунтах применяют свайные фундаменты различных конструкций и видов. Это, прежде всего, сваи забивные, вдавливаемые, набивные в пробитых скважинах, прочие сваи с уширениями, как утверждают В.И. Крутов, А.С. Ковалев, В.А. Ковалев [24]:

- забивные сваи, которые используются для создания жесткой структуры, способной передавать нагрузки через просадочный грунт на более устойчивые слои, что дает возможность минимизировать осадку и повысить общую стабильность сооружения;
- вдавливаемые сваи, которые занимают меньше пространства и могут быть установлены в ограниченных условиях, обеспечивая надежную опору для фундаментов;
- набивные сваи, они размещаются в предварительно пробитых скважинах.

Также продолжается разработка новых конструкций свайных фундаментов, используемых при возведении зданий и сооружений на лёссовых грунтах. В качестве примера можно привести работу Ф.Г. Габиева [25].

Использование свайного фундамента позволяет передать нагрузку на более глубокие и стабильные слои грунта, нивелируя тем самым влияние просадочных грунтов.

*2. Уплотнение или закрепление просадочного грунта.*

Уплотнение просадочных грунтов может включать в себя различные техники, направленные на увеличение их плотности и снижение подвижности. Это могут быть такие методы, как:

- механическое уплотнение с помощью вибрационных установок;

- использование специальных добавок для химического закрепления грунта;
- предварительное замачивание и пригрузка просадочного основания.

Эти методы предназначены для уменьшения просадочности и повышения несущей способности грунтов, а также улучшения их механических свойств. Применение различных способов стабилизации, таких как инъекции цементного раствора или геосинтетиков, помогают повысить несущую способность грунта и снизить его восприимчивость к увлажнению.

*3. Метод устройства грунтовых подушек.*

Данный метод включает в себя замену просадочного грунта на непросадочный. Это достигается созданием искусственного основания, которое помогает снизить риск деформации. Подушки могут быть выполнены из песка, щебня или других непросадочных материалов. Такой подход не только улучшает стабильность фундамента, но и может уменьшить риски, связанные с динамическими нагрузками.

Поскольку проектирование фундаментов на просадочных грунтах требует комплексного подхода, учитывающего как свойства грунта, так и специфические нагрузки, действующие на основание, важно использование разнообразных методов, в том числе современных технологий, которые позволяют обеспечить безопасность и повысить надежность строений, расположенных на этих сложных грунтах. Открытость к новым подходам и внедрение инноваций по-прежнему имеют решающее значение для успешного проектирования и строительства.

Разработка методов устройства фундаментов на просадочных, или лёссовых, грунтах представляет собой сложную и многоаспектную задачу. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, которые зависят от конкретных условий проектирования и характеристик грунта.

Основная проблема, возникающая при проектировании фундаментов на грунтах со II типом просадочности, — недооценка влияния дополнительных нагрузок, передаваемых на сваи нагружающего трения, возникающего при просадке грунтов от их собственного веса. Для устранения или уменьшения воздействия сил нагружающего трения на сваю применяют различные способы:

- устройство свайных фундаментов из асбестоцементных труб, что дает возможность уменьшить силы негативного трения на 20–30 % [26];
- использование отхода очистки масел — гумбина — в качестве смазки свай, что позволяет снять силы нагружающего трения;
- метод, разработанный Ф. Габиевым, — устройство свай в оболочках из утилизированных покрышек.

## Численное моделирование

Численное моделирование на таких платформах, как PLAXIS 2D, позволяет получить более

точные результаты и прогнозировать поведение фундамента в различных условиях. Это особенно актуально для оценки осадки фундамента, которая может существенно повлиять на устойчивость здания и его долговечность. Моделирование помогает решить следующие задачи: расчета осадки, где важно дать ее верную оценку при различных нагрузках и грунтовых условиях; анализа сдвиговых напряжений; дать оценку устойчивости, при которой может произойти разрушение грунта.

Невозможность выделить один универсальный метод, подходящий для всех условий, подчеркивает значимость разработки индивидуальных решений, основанных на местных геологических и гидрогеологических условиях. Исследования, проводимые в данной области, продолжают способствовать созданию более надежных и экономически эффективных методов строительства фундаментов на просадочных грунтах. Таким образом, применение современных программных комплексов в сочетании с теоретическими исследованиями является эффективным в части реализации экономически выгодных проектов.

Задача, решенная авторами, позволяет детально изучить значимость методологического подхода в проектировании фундаментов специализированных зданий, таких как многофункциональные комплексы, особенно при наличии таких специфических геологических условий, как в приведенном далее случае. Рассмотрим ключевые аспекты, связанные с проектированием и моделированием фундамента в сложных геологических условиях.

При изучении инженерно-геологического строения принятого в исследовании участка пробурено 28 скважин глубиной 55–60 м. В ходе изысканий выявлены четвертичные отложения различного генезиса и возраста. В результате анализа проведенных опытных, лабораторных и буровых работ, а также изучения архивных материалов, на площадке изысканий для строительства многофункционального комплекса было выделено 20 инженерно-геологических элементов. Пример одного из разрезов показан на рис. 2.

### Расчетная модель

Рассматривая процесс откопки котлована и последующее строительство, следует учесть множество факторов:

1. Типы элементов модели: использование плоских или объемных элементов для свайного поля в программном обеспечении, таком как PLAXIS 2D, имеет свои нюансы. Объемные элементы лучше воспроизводят реальное распределение усилий, поскольку учитывают фактическую толщину свай и ростверка, что уменьшает вероятность завышенных расчетных значений усилий в сваях.

2. Создание так называемой фиктивной плиты, что является важным этапом, позволяющим обеспечить правильное функционирование элементов

Embedded Beam. Фиктивная плита, механически выполняя функцию бетонной подготовки, обеспечивает необходимые соединения между ростверком и сваями, что обеспечит более надежное распределение нагрузок и уменьшит вероятность возникновения потенциально аварийных ситуаций в дальнейшем.

3. Сборка схемы: в процессе моделирования необходимо установить адекватные нагрузочные схемы, чтобы учесть как статические, так и динамические воздействия на здание, что включает в себя анализ не только вертикальных, но и горизонтальных нагрузок, которые могут действовать на сооружение в процессе эксплуатации, как было установлено Р.А. Мангушевым, И.П. Дьяконовым, В.М. Полуниным [27].

Таким образом, видно, что моделирование фундамента требует комплексного подхода, учитывающего геологическое строение, механические свойства материалов и влияние внешних факторов. Правильное использование специализированных программных средств, таких как PLAXIS, не только облегчает понимание проектируемой конструкции, но и значительно уменьшает риски, связанные с деформациями и разрушениями фундаментов. Важно регулярно проводить верификацию расчетов на основании реальных данных, полученных из полевых исследований и лабораторных испытаний, чтобы гарантировать надежность и безопасность сооружения в целом.

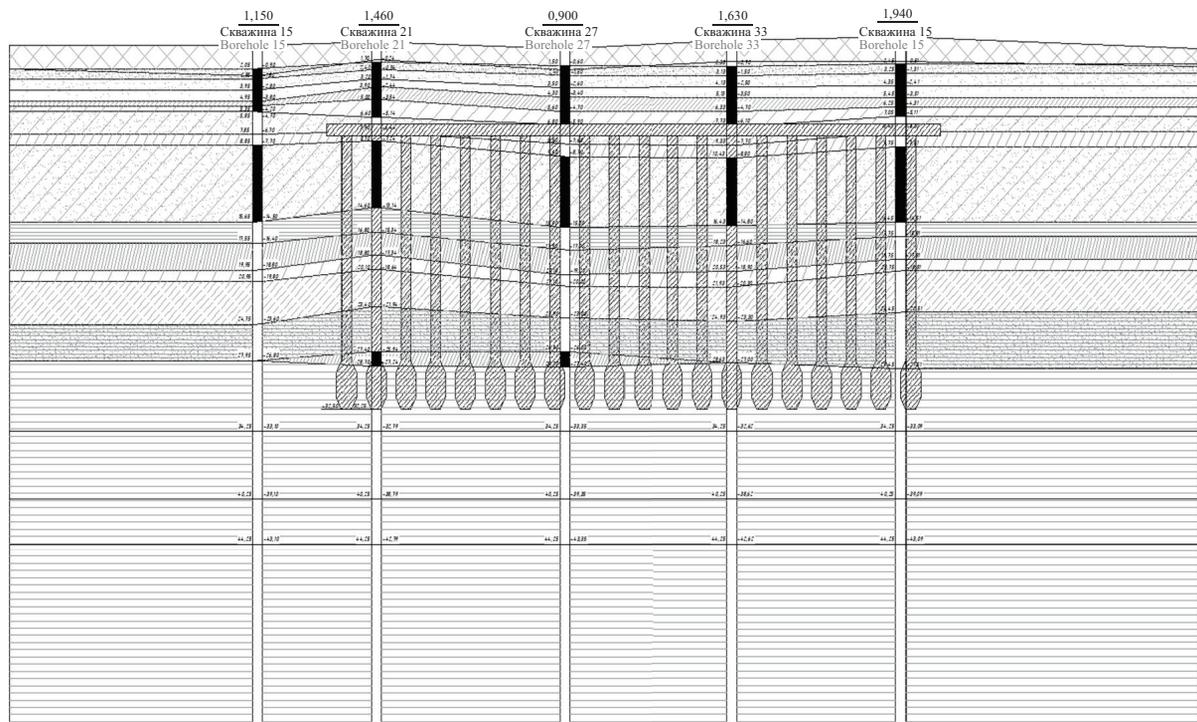
В описываемом расчете моделировались буронабивные сваи  $d = 1000$  мм с уширенной пятой  $d = 1600$  мм. Шаг свай  $3d = 3 \cdot 1 = 3$  м. Сваи объединены бетонным ростверком толщиной 1 м.

Габариты соответствующего здания в плане составляют  $65 \times 45$  м. Смоделирована развитая подземная часть, представленная двухэтажной парковкой. Вышележащие конструкции при моделировании заменены нагрузкой. В качестве ограждения котлована используется стена в грунте толщиной 800 мм и глубиной 14 м. Стена в грунте дополнительно укреплена грунтовыми анкерами.

Из-за наличия высокого уровня подземных вод предусмотрены мероприятия по осушению и водопонижению. Дополнительно выполнены мероприятия по защите конструкций от воздействия подземных вод.

В качестве модели для грунтовых условий выбрана модель Hardening Soil (HS, модель упрочняющегося грунта), позволяющая в данном случае учитывать упрочнение при сдвиге и сжатии.

Модель Soft Soil для подобных расчетов не применяется, так как из-за необходимости проведения только компрессионных испытаний и дальнейшего автоматического моделирования программой поведения грунта в условиях трехосного сжатия неточно отображает поведение грунта при устройстве котлованов. Такая модель наиболее применима при расчете насыпей и оснований для них. В иных случаях (таких, как, например, рассматриваемая задача) рекомендуется модель Hardening Soil [28].



-  Насыпные грунты (ИГЭ-12)  
Bulk soils (Geotechnical unit-1g)
-  Пески пылеватые, средней плотности, насыщенные водой (ИГЭ-2г)  
Silty sand of medium density, water-saturated sand (Geotechnical unit-2g)
-  Пески пылеватые, плотные, насыщенные водой (ИГЭ-2в)  
Silty sand, dense, water-saturated (Geotechnical unit-2v)
-  Пески крупные, средней плотности, насыщенные водой (ИГЭ-2б)  
Coarse sand, average density, water-saturated (Geotechnical unit-2b)
-  Суглинки пылеватые, тяжелые, пластичные, просадочные (ИГЭ-2)  
Silty loams, heavy, plastic, subsident (Geotechnical unit-2)
-  Суглинки пылеватые, легкие, пластичные, просадочные (ИГЭ-2д)  
Silty loams, light, plastic, subsident (Geotechnical unit-2d)
-  Суглинки пылеватые, легкие, с примесью супесей и прослоями песка (ИГЭ-3)  
Silty loams, light, with interlayers of sandy loam and sand (Geotechnical unit-3)
-  Суглинки пылеватые, легкие, мягкопластичные (ИГЭ-3а)  
Silty loams, light, soft plastic (Geotechnical unit-3a)
-  Глины пылеватые, легкие, текучепластичные (ИГЭ-4)  
Silty clay, light, high plasticity (Geotechnical unit-4)
-  Суглинки пылеватые, тяжелые, текучие (ИГЭ-4а)  
Silty loams, heavy, liquid (Geotechnical unit-4a)
-  Суглинки пылеватые, легкие, мягкопластичные, с прослоями песка (ИГЭ-5)  
Silty loams, light, soft plastic, with interlayers of sand (Geotechnical unit-5)
-  Супеси песчаные, с гравием, галькой, с гнездами песка, пластичные (ИГЭ-6)  
Sandy loam with gravel and shingle, plastic (Geotechnical unit-6)
-  Глины пылеватые, твердые, с прослоями песка, дислоцированные (ИГЭ-7)  
Silty clay, firm, with interlayers of sand, dislocated (Geotechnical unit-7)
-  Суглинки пылеватые, легкие, обогащенные глинистым материалом, твердые (ИГЭ-7а)  
Silty loams, light, clay-enriched, solid (Geotechnical unit-7a)
-  Глины пылеватые, твердые, с прослоями песка (ИГЭ-8)  
Silty clay, solid, with interlayers of sand (Geotechnical unit-8)

Рис. 2. Геологический разрез на основе пяти скважин

Fig. 2. Geological section based on five wells

Для успешного проведения расчетов на просадку и анализа несущей способности свай в PLAXIS 2D необходимо рассмотреть несколько ключевых аспектов, которые дадут возможность оптимизировать проект и гарантировать выполнение требований строительных норм и правил. При II типе просадочности, когда просадки происходят в том числе от величины собственного веса и превышают 5 см, требуется определить величину просадочной толщи. При этом следует учитывать значения относительной просадочности  $\epsilon_{sl}$ , которые в рассматриваемом случае находятся в широком диапазоне от значений, меньших 0,001 до 0,071 (для ИГЭ-2).

Принимаем глубину просадочной толщи, равной  $H_c = 27,7$  м, до ИГЭ-8 согласно СП 22.13330.2016<sup>1</sup>:

Расчет просадки производится по формуле:

$$s_{sl} = \sum \epsilon_{sl,i} \cdot h_i \cdot k_{sl,i} \quad (1)$$

При получившемся коэффициенте  $k_{sl} = 1$  осадка  $s_{sl}$  составила 8,2 см.

### Оценка просадочной толщи

В соответствии с условиями, установленными в СП 22.13330.2016, необходимо определить просадочную толщину в пределах  $H_c = 27,7$  м до уровня ИГЭ-8. Отметим, что при расчете осадок важно учитывать величину относительной просадочности  $\epsilon_{sl}$ , которая колеблется между 0,001 и 0,071 для II типа просадочности. Это значение напрямую влияет на расчет максимальной осадки здания и соответственно требует корректного выбора конструктивных решений.

### Оценка максимальной осадки

Согласно приложению Г1 СП 22.13330.2016<sup>1</sup>, максимальная осадка не должна превышать 15 см.

Для выполнения этого условия необходимо обеспечить подбор свайного поля с учетом геологических условий и свойств грунтов, чтобы минимизировать осадочные деформации, возникающие от собственных нагрузок конструкции. Способы уменьшения осадки могут включать:

- оптимизацию проектирования свай: использование свай с большими диаметрами и уширениями для повышения устойчивости и несущей способности;
- усиление грунтов: применение различных методов, таких как инъекционная замена или механическое уплотнение, позволяющие повысить прочностные характеристики грунта.

Характеристики грунтов для расчета просадочности приведены в таблице.

### Моделирование уширенной пяты свай

Стоит отметить, что PLAXIS 2D не позволяет моделировать переменные диаметры свай напрямую, поэтому необходимо использовать индивидуальные элементы для моделирования уширенной пяты, что позволит получить более точные результаты по взаимодействию свай с грунтом и уточнить характеристики осадочных деформаций.

При моделировании уширения сваи была реализована следующая последовательность:

- этап 1. Моделирование основной части сваи в соответствии с внутренними графическими данными о геометрии и механических свойствах;
- этап 2. Создание отдельного элемента, представляющего уширение, и его интеграция с основным элементом сваи на этапе работы;
- этап 3. Анализ взаимодействия грунта и свай с учетом расчетных нагрузок и коэффициентов, соответствующих условиям эксплуатации.

<sup>1</sup> СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83, п. 6.1.16.

Характеристики грунтов для расчета просадочности

Soil characteristics for calculating subsidence

Номер слоя Layer number	Номер инженерно-геологического элемента Geotechnical unit number	Толщина слоя $h$ , м Layer thickness $h$ , m	Относительная просадочность $\epsilon_{sl}$ Relative drawdown $\epsilon_{sl}$	Коэффициент $k_{sl}$ Coefficient $k_{sl}$
1	1Г / g	1,8	0,002	1
2	2Г / g	0,9	0,001	
3	2В / v	1	0,001	
4	2Б / b	1	0,001	
5	2	0,4	0,071	
6	2Д / d	0,5	0,063	
7	3	2	0,001	
8	3а	1	0,001	
9	3	6,8	0,001	
10	4	1,9	0,001	
11	4а	2,4	0,001	
12	5	1	0,001	
13	6	3,8	0,001	
14	7	3,2	0,001	

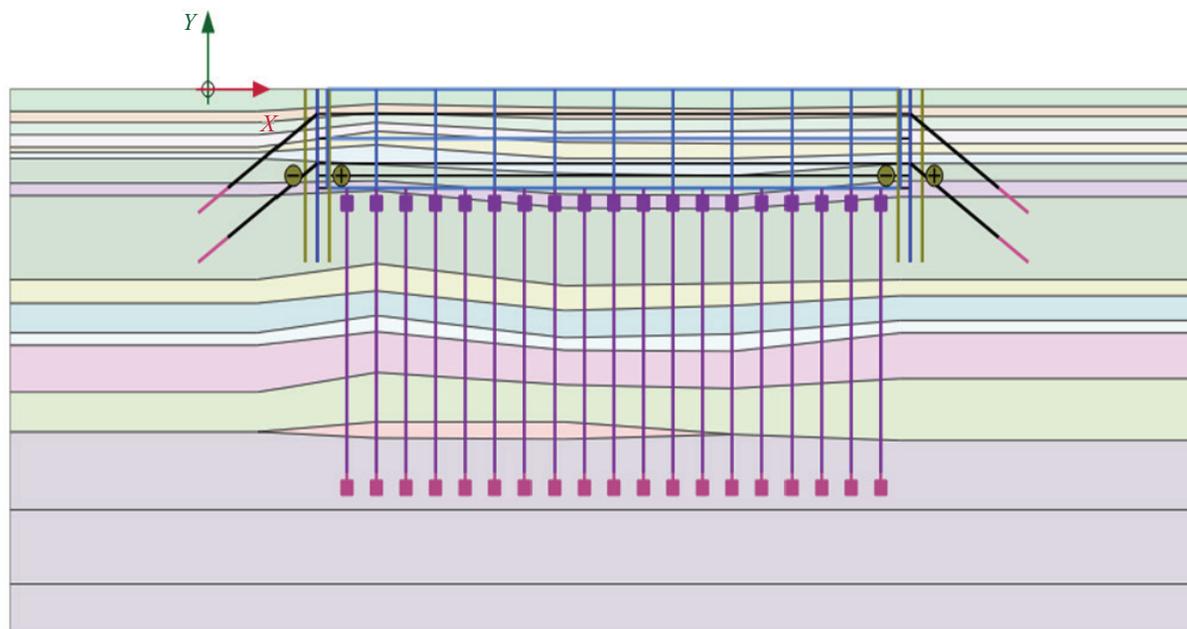


Рис. 3. Расчетная модель задачи в PLAXIS 2D

Fig. 3. Calculation model of the problem in PLAXIS 2D

### Расчет несущей способности свай

Согласно СП 24.13330.2011<sup>2</sup>, для определения несущей способности сваи по грунту используются различные методы, включая расчет сопротивления по боковой поверхности и сопротивление на основании. Исходя из данного подхода, можно формулировать следующие параметры:

- несущая способность может быть оценена с учетом деформационных характеристик грунта, что важно для оценивания состояния фундамента в условиях просадки;
- для более точного прогнозирования несущей способности свай применяется методика, учитывающая не только статические, но и динамические нагрузки.

Поскольку PLAXIS не позволяет моделировать свайные элементы с переменным диаметром, принято решение смоделировать уширение отдельным элементом и на этапе включения свай в работу активировать оба элемента (рис. 3).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно п. 7.2.2 СП 24.13330.2011, несущая способность сваи по грунту равна<sup>2</sup>:

$$F_d = \gamma_c \cdot (\gamma_{cR} \cdot R \cdot A + u \sum \gamma_{cf} \cdot f_i \cdot h_i), \quad (2)$$

где  $\gamma_c = 1$  — коэффициент условий работы сваи;  $\gamma_{cR} = 1$  — коэффициент условий работы грунта под нижним концом сваи;  $R = 3780$  кПа — расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи;  $A = 2,01$  м<sup>2</sup> — площадь опирания сваи;  $u = \pi D = 3,14 \times 1 = 3,14$  м — наружный периметр поперечного сечения

стволоа;  $\gamma_{cf} = 0,8$  — коэффициент условий работы грунта по боковой поверхности сваи (для буровой сваи).

Итого несущая способность сваи:

$$F_d = 1 \cdot (1 \cdot 3780 \cdot 2,01 + 3,14 \cdot 0,8 \cdot 1316) = 10\,904 \text{ кН.}$$

Расчетная допускаемая нагрузка:  $N = 1,15 \times 10\,904 / (1,2 \cdot 1,4) = 7464 \text{ кН} = 746,4 \text{ т.}$

По результатам проведенных на площадке статических испытаний, выполненных на основе архивных материалов, фактическая несущая способность сваи должна быть выше. При расчете несущей способности сваи-стойки (п. 7.2.1 СП 24.13330.2011):

$$F_d = \gamma_c \cdot R \cdot A, \quad (3)$$

где  $\gamma_c = 1$  — коэффициент условий работы сваи;  $R = 20\,000$  кПа — расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи;  $A = 2,01$  м<sup>2</sup> — площадь опирания сваи.

Итого несущая способность сваи:

$$F_d = 1 \cdot 20\,000 \cdot 2,01 = 40\,200 \text{ кН.}$$

Расчетная допускаемая нагрузка равна:  $N = 1,15 \times 40\,200 / (1,2 \cdot 1,4) = 27\,518 \text{ кН} = 2752 \text{ т.}$

Несущая способность сваи по материалу определяется по формуле:

$$F_{Rm} = \gamma_c \varphi (\gamma_{cb} \gamma_{cb'} R_b A_b + \gamma_a R_{sc} A_s), \quad (4)$$

где  $\gamma_c = 1$  — коэффициент условия работы сваи при  $d > 0,2$  м;  $\varphi = 1$  — коэффициент продольного изгиба для низкого ростверка;  $\gamma_{cb} = 0,85$  — коэффициент, учитывающий условия работы;  $\gamma_{cb'} = 0,8$  — коэффициент, учитывающий способ производства;

<sup>2</sup> СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03–85, п. 7.2.

$R_b = 19\,500$  кПа — расчетное сопротивление бетона сжатию;  $A_b$  — площадь поперечного сечения бетона, м<sup>2</sup>;  $\gamma_d = 1$  — коэффициент условий работы арматуры;  $R_{sc} = 435\,000$  кПа — расчетное сопротивление арматуры А500 сжатию;  $A_s$  — площадь поперечного сечения арматуры, м<sup>2</sup>.

Значение несущей способности сваи по материалу:

$$F_{Rm} = 1 \cdot 1 \cdot (0,85 \cdot 0,8 \cdot 19\,500 \cdot 2,01 + 1 \cdot 435\,000 \cdot 0,0145) = 32\,960 \text{ кН.}$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам расчетов и последующего моделирования в PLAXIS 2D было установлено следующее.

Максимальная осадка здания составила 6,38 см, минимальное значение осадки равно 0,12 см. Максимальная относительная разница осадок составляет 0,001, что соответствует требованиям нормативной документации.

С учетом проведенного расчета просадки от собственного веса грунта максимальная осадка здания составит  $s_{\max} = 8,2 + 6,38 = 14,58$  см. Относительная разность осадок с учетом просадки 0,001, что также удовлетворяет требованиям нормативной документации.

Однако, помимо применения буронабивных свай с уширением, также рекомендуется предпринять дополнительные мероприятия по снижению величин как осадок, так и просадок.

Результат расчета в ПК PLAXIS 2D приведен на рис. 4.

В результате испытаний и расчетов по различным методикам были получены следующие величины несущей способности свай:

- по грунту (п. 7.2.2 СП 24.13330.2011):  
 $F_d = 3780 \cdot 1,093 + 3,71 \cdot 0,8 \cdot 1316 = 804 \text{ т;}$
- по грунту (п. 7.2.1 СП 24.13330.2011):  
 $F_d = 1 \cdot 20\,000 \cdot 1,093 = 2186 \text{ т;}$
- по материалу:  
 $F_{Rm} = 1 \cdot 1 \cdot (0,85 \cdot 0,8 \cdot 19\,500 \cdot 1,093 + 1 \times 43\,500 \cdot 0,0145) = 2080 \text{ т.}$

Согласно требованиям ГОСТ 5686–2012<sup>3</sup>, несущая способность сваи по материалу равна 2080 т, в качестве максимальной нагрузки принимается значение не более 2000 т.

Характеристики грунтового массива определены по результатам полевых и лабораторных испытаний, а также с помощью архивных данных о строительстве на данной местности.

При расчетах и моделировании получены следующие результаты:

- максимальная осадка — 7,01 см;
- максимальная относительная разность осадок здания — 0,0011.

Результаты расчета в ПК PLAXIS 2D представлены на рис. 5.

<sup>3</sup> ГОСТ 5686–2012. Грунты. Методы полевых испытаний сваями, п. 8.2.4.

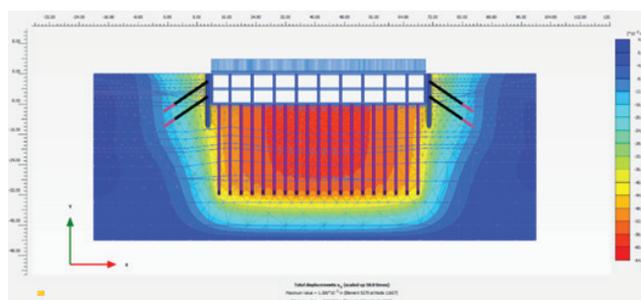


Рис. 4. Результаты моделирования в PLAXIS 2D. Осадка здания

Fig. 4. Simulation results in PLAXIS 2D. Building settlement

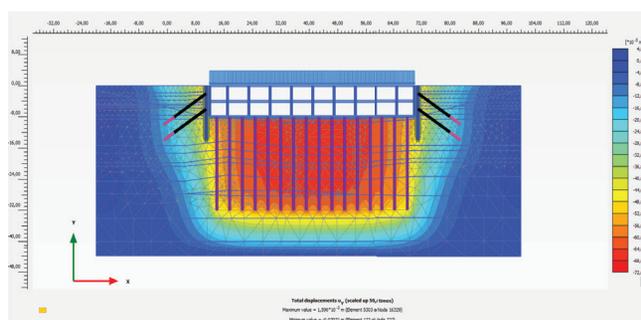


Рис. 5. Результаты моделирования в ПК PLAXIS 2D. Осадка здания

Fig. 5. Simulation results in PC PLAXIS 2D. Building settlement

В соответствии с табл. Г1 СП 22.13330.2016 для каркасных зданий с железобетонным и стальным каркасом и монолитными железобетонными перекрытиями значения предельных деформаций составляют:

- максимальная осадка — не более 15 см;
- максимальная относительная разность осадок здания — не более 0,003.

Таким образом, согласно реализуемой методике расчета требования СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83 по предельно допустимым деформациям выполняются.

Проведенные расчеты в ПК PLAXIS 2D показали высокую эффективность данного инструмента для оценки осадок и их динамики на стадии проектирования и эксплуатации. Использование модели Hardening Soil обеспечивает более точное и адекватное описание поведения просадочных грунтов по сравнению с традиционными моделями (Кулона – Мора, Soft Soil), учитывая их пластическое поведение, уплотнение и влияние замачивания.

Исследования подтвердили, что замачивание грунта приводит к существенному увеличению осадок вследствие снижения прочности структурных связей и перераспределения порового давления. Результаты расчетов продемонстрировали, что при замачивании максимальная осадка здания увеличивается с 6,38 до 14,58 см, а при учете собственного веса грунта может достигать 15,21 см, что приближается к предельно допустимому значению. Максимальная относительная разность осадок при этом

составила 0,001, что соответствует установленным нормативным требованиям ( $\leq 0,003$ ).

Для минимизации величин осадок и просадок рекомендуется использование комплекса инженерных решений, включая применение буронабивных свай с уширением в нижней части, что обеспечивает повышение несущей способности основания и снижение деформаций. Увеличение глубины забивки свай также способствует равномерному распределению нагрузок и уменьшению осадок.

Предварительное замачивание грунта показало свою эффективность как метод управляемого проявления просадочных деформаций до начала строительства, что позволяет избежать значительных осадок в процессе эксплуатации. Наряду с этим применение дренажных систем предотвращает переувлажнение грунта и снижает вероятность его просадки. Использование легких строительных материалов и методов упрочнения грунтов (механическое уплотнение, химическое закрепление) способствует повышению устойчивости основания.

В процессе эксплуатации критически важной является организация системы мониторинга осадок для своевременного выявления отклонений от расчетных значений и принятия необходимых корректирующих мер.

Таким образом, совокупность проведенных расчетов и принятых проектных решений подтверждает возможность обеспечения надежности и долговечности сооружений при строительстве на просадочных грунтах при условии соблюдения проектных рекомендаций и соответствия нормативным требованиям.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Alarcón Posse A.J., Rodríguez Rebolledo J.F., Buriticá García J.A., Caicedo Hormaza B., Rodríguez-Rincón E. Validation of a 3D numerical model for piled raft systems founded in soft soils undergoing regional subsidence // *Soils and Rocks*. 2021. Vol. 44. Issue 1. Pp. 1–15. DOI: 10.28927/SR.2021.053620
2. Alnuaim A.M., El Naggar M.H., El Naggar H. Performance of micropiled rafts in clay: numerical investigation // *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 99. Pp. 42–54. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.02.020
3. Rebolledo J.F.R., León R.F.P., Camapum de Carvalho J. Obtaining the Mechanical Parameters for the Hardening Soil Model of Tropical Soils in the City of Brasília // *Soils and Rocks*. 2019. Vol. 42. Issue 1. Pp. 61–74. DOI: 10.28927/SR.421061
4. Sinha A., Hanna A.M. 3D numerical model for piled raft foundation // *International Journal of Geomechanics*. 2017. Vol. 17. Issue 2. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000674
5. Zhang L., Liu H. Seismic response of clay-pile-raft-superstructure systems subjected to far-field ground motions // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017. Vol. 101. Pp. 209–224. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.08.004
6. Сергеев Е.М., Ларионов А.К., Комиссарова Н.Н. Лессовые породы СССР. Т. 1. Инженерно-геологические особенности и проблемы рационального использования. М., 1986. 273 с.
7. Hu R.L., Yue Z.Q., Wang L.C., Wang S.J. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China // *Engineering Geology*. 2004. Vol. 76. Issue 1–2. Pp. 65–77. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.06.006
8. Akhtar N., Syakir Ishak M.I., Bhawani S.A., Umar K. Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation : a review // *Water*. 2021. Vol. 13. Issue 19. P. 2660. DOI: 10.3390/w13192660
9. Cigna F., Tapete D. Urban growth and land subsidence: multi-decadal investigation using human settlement data and satellite InSAR in Morelia, Mexico // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 811. P. 152211. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152211
10. Mohebbi Tafreshi G., Nakhaei M., Lak R. Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran // *Geojournal*.

2021. Vol. 86. Issue 3. Pp. 1203–1223. DOI: 10.1007/s10708-019-10129-8

11. Mehrnoor S., Robati M., Kheirkhah Zarkesh M.M., Farsad F., Baikpour S. Land subsidence hazard assessment based on novel hybrid approach: BWM, weighted overlay index (WOI), and support vector machine (SVM) // *Natural Hazards*. 2023. Vol. 115. Issue 3. Pp. 1997–2030. DOI: 10.1007/s11069-022-05624-0

12. Пантюшина Е.В. Лессовые грунты и инженерные методы устранения их просадочных свойств // *Ползуновский вестник*. 2011. № 1. С. 127–130. EDN MSAYPU.

13. Абелев М.Ю., Козьмодемьянский В.Г., Бахронов Р.Р. Устройство уплотненных песчаных оснований многоэтажных зданий при строительстве на слабых грунтах // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 10. С. 69–73. EDN SWMCJV.

14. Будикова А.М., Отенберген Н.О. Инженерно-геологические исследования лессовых просадочных грунтов // *Проблемы науки*. 2018. № 4 (28). С. 43–46. EDN YWULGZ.

15. Филоненко И.Н. Анализ взаимодействия конструкции с просадочным грунтом основания // *Молодой исследователь Дона*. 2018. № 3 (12). С. 144–146. EDN UWLQOK.

16. Астахов В.И., Пестова Л.Е., Шкатова В.К. Лёссоиды Российской Федерации: распространение и возраст // *Региональная геология и металлогения*. 2021. № 87. С. 42–60. DOI: 10.52349/08697892\_2021\_87\_42-60. EDN LVSOXJ.

17. Швецов Г.И., Гатилов Ю.А., Носков И.В. Исследование совместной работы песчаной подушки и ее основания из лессовых просадочных грунтов // *Ползуновский вестник*. 2007. № 1–2. С. 102–104. EDN KZCLAL.

18. Носков И.В. Аварийное состояние зданий при локальном замачивании лессовых просадочных грунтов // *Ползуновский вестник*. 2007. № 1–2. С. 60–62. EDN KZCKWP.

19. Выскребенцев В.С. Прочностные свойства лёссовых просадочных грунтов при статических и динамических нагрузках // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. № 3. С. 38–42. EDN VNUVOP.

20. Вяткина Е.И. Исследование изменений характеристик микроструктуры лессового просадочного грунта при различных механических воздействиях // *Ползуновский вестник*. 2007. № 1–2. С. 13–22. EDN JWPEKQ.

21. Лебзак В.Н. Изменение прочностных и деформационных характеристик лессовых просадочных грунтов при длительной эксплуатации зданий и сооружений // *Ползуновский вестник*. 2011. № 1. С. 240–246. EDN OCSKJV.

22. Стещенко Д.М., Козубаль Я.В., Головань Р.Н., Абдураимова М.А., Зеленко А.А., Ревезук А.А. Применение комплексной технологии устройства фундаментов на просадочных грунтах при строительстве многоэтажного жилого дома в Ростове-на-Дону // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 5 (116). С. 587–598. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.587-598. EDN XQWEEN.

23. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. 3-е изд., доп. и перераб. М. : АСВ, 2023. 1084 с.

24. Крутов В.И., Попсуенко И.К. Устранение просадок лёссовых грунтов от их собственного веса путем армирования лёссовой толщи // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1976. № 5. С. 17–19. EDN WCGLPN.

25. Габибов Ф.Г. Разработка инновационных конструкций свайных фундаментов на просадочных грунтах // *Construction and Geotechnics*. 2022. Т. 13. № 1. С. 34–43. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.03. EDN JJOTFJ.

26. Соколов Н.С. Технические возможности устройства буроинъекционных свай // *Социально-гуманитарные, естественные и технические исследования: проблемы теории и практики* : мат. IV Всеросс. науч.-практ. конф. 2024. С. 146–150. EDN OJNRIK.

27. Мангушев Р.А., Дьяконов И.П., Полунин В.М. Численные расчеты в геотехнической практике. М. : Изд-во АСВ, 2023. 316 с.

28. Толмачев Д.А., Рамазанов А.Г. Определение несущей способности одиночной сваи путем моделирования испытаний в программном комплексе Plaxis 2D // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 7 (103). С. 616–622. EDN NQATER.

Поступила в редакцию 20 февраля 2025 г.

Принята в доработанном виде 23 февраля 2025 г.

Одобрена для публикации 5 мая 2025 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Надежда Сергеевна Никитина — кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; NikitinaNS@mgsu.ru;

Данила Александрович Кравченко — инженер производственно-технического отдела; **Сервис карьерных машин (СКМ);** 109052, г. Москва, ул. Нижегородская, д. 29–33, стр. 1, офис 1309; kieran.jv.x@gmail.com;

Надежда Вячеславовна Ремизова — ассистент кафедры геотехники; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);** 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; nadevya@yandex.ru.

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## REFERENCES

1. Alarcón Posse A.J., Rodríguez Rebolledo J.F., Buritica García J.A., Caicedo Hormaza B., Rodríguez-Rincón E. Validation of a 3D numerical model for piled raft systems founded in soft soils undergoing regional subsidence. *Soils and Rocks*. 2021; 44(1):1-15. DOI: 10.28927/SR.2021.053620
2. Alnuaim A.M., El Naggar M.H., El Naggar H. Performance of micropiled rafts in clay: numerical investigation. *Computers and Geotechnics*. 2018; 99:42-54. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.02.020
3. Rebolledo J.F.R., León R.F.P., Camapum de Carvalho J. Obtaining the Mechanical Parameters for the Hardening Soil Model of Tropical Soils in the City of Brasília. *Soils and Rocks*. 2019; 42(1):61-74. DOI: 10.28927/SR.421061
4. Sinha A., Hanna A.M. 3D numerical model for piled raft foundation. *International Journal of Geomechanics*. 2017; 17(2). DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000674
5. Zhang L., Liu H. Seismic response of clay-pile-raft-superstructure systems subjected to far-field ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2017; 101:209-224. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.08.004
6. Sergeev E.M., Larionov A.K., Komissarova N.N. *Loess rocks of the USSR. Vol. 1. Engineering-geological features and problems of rational use*. Moscow, 1986; 273. (rus.).
7. Hu R.L., Yue Z.Q., Wang L.C., Wang S.J. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Engineering Geology*. 2004; 76(1-2):65-77. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.06.006
8. Akhtar N., Syakir Ishak M.I., Bhawani S.A., Umar K. Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation : a review. *Water*. 2021; 13(19):2660. DOI: 10.3390/w13192660
9. Cigna F., Tapete D. Urban growth and land subsidence: multi-decadal investigation using human settlement data and satellite InSAR in Morelia, Mexico. *Science of The Total Environment*. 2022; 811:152211. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152211
10. Mohebbi Tafreshi G., Nakhaei M., Lak R. Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran. *Geojournal*. 2021; 86(3):1203-1223. DOI: 10.1007/s10708-019-10129-8
11. Mehrnoor S., Robati M., Kheirkhah Zarkesh M.M., Farsad F., Baikpour S. Land subsidence hazard assessment based on novel hybrid approach: BWM, weighted overlay index (WOI), and support vector machine (SVM). *Natural Hazards*. 2023; 115(3):1997-2030. DOI: 10.1007/s11069-022-05624-0
12. Pantyushina E.V. Loess soils and engineering methods for eliminating their subsidence properties. *Polzunovskiy Vestnik*. 2011; 1:127-130. EDN MSAYPU. (rus.).
13. Abelev M.Yu., Kozmodemyanskiy V.G., Bakhronov R.R. Arrangement of compacted sand bases of multistory buildings constructed on soft soils. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 10:69-73. EDN SWMCJV. (rus.).
14. Budikova A.M., Otepbergen N.O. Engineering-geological studies of loess subsidence soils. *Problems of Science*. 2018; 4(28):43-46. EDN YWULGZ. (rus.).
15. Filonenko I.N. Interaction analysis of constructions and subsiding soil. *Young Don Researcher*. 2018; 3(12):144-146. EDN UWLQOK. (rus.).
16. Astakhov V.I., Pestova L.E., Shkatova V.K. Loessoids of the Russian Federation: distribution and age. *Regional Geology and Metallogeny*. 2021; 87:42-60. DOI: 10.52349/08697892\_2021\_87\_42-60. EDN LVSOXJ. (rus.).
17. Shvetsov G.I., Gatilov Yu.A., Noskov I.V. Study of the joint work of a sand cushion and its base made of loess subsidence soils. *Polzunovskiy Vestnik*. 2007; 1-2:102-104. EDN KZCLAL. (rus.).
18. Noskov I.V. Emergency condition of buildings during local soaking of loess subsidence soils. *Polzunovskiy Vestnik*. 2007; 1-2:60-62. EDN KZCKWP. (rus.).
19. Vyskrebentsev V.S. Strength properties of loess subsidence soils under static and dynamic loads. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2016; 3:38-42. EDN VNUVOP. (rus.).
20. Vyatkina E.I. Study of changes in the characteristics of the microstructure of loess subsidence soil under various mechanical influences. *Polzunovskiy Vestnik*. 2007; 1-2:13-22. EDN JWPEKQ. (rus.).
21. Lebzak V.N. Changes in the strength and deformation characteristics of loess subsidence soils during long-term operation of buildings and structures. *Polzunovskiy Vestnik*. 2011; 1:240-246. EDN OCSKJV. (rus.).
22. Steshenko D.M., Kozubal Ja., Golovan R.N., Abduraimova M.A., Zelenko A.A., Reveguk A.A. Use of integrated technology of foundation installation on collapsible soils in construction of high-rise building in Rostov-on-Don. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(5):(116):587-598. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.587-598. EDN XQWEEH. (rus.).
23. *Geotechnician's Handbook. Foundations, foundations and underground structures / under the general ed. V.A. Ilyichev and R.A. Mangusheva*. 3rd ed., add. and revised Moscow, ASV, 2023; 1084. (rus.).
24. Krutov V.I., Popsuenko I.K. Elimination of subsidence of loess soils from its own weight by reinforcing the loess layer. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1976; 5:17-19. EDN WCGLPN. (rus.).
25. Gabibov F.G. Development of innovative pile foundation designs on subsidence soils. *Construction and*

*Geotechnics*. 2022; 13(1):34-43. DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.03. EDN JJOTFJ. (rus.).

26. Sokolov N.S. Technical possibilities of drilling piles. *Social and humanitarian, natural and technical research: problems of theory and practice : proceedings of the IV All-Russian scientific and practical conference*. 2024; 146-150. EDN OJNRIK. (rus.).

27. Mangushev R.A., Dyakonov I.P., Polunin V.M. *Numerical calculations in geotechnical practice*. Moscow, ASV Publishing House, 2023; 316. (rus.).

28. Tolmachev D.A., Ramazanov A.G. Test simulation of single pile bearing capacity by Plaxis 2D. *Engineering journal of Don*. 2023; 7(103):616-622. EDN NQATER. (rus.).

*Received February 20, 2025.*

*Adopted in revised form on February 23, 2025.*

*Approved for publication on May 5, 2025.*

**B I O N O T E S:** **Nadezhda S. Nikitina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; NikitinaNS@mgsu.ru;

**Danila A. Kravchenko** — engineer of the Production and Technical Department; **Quarry Machine Service**; office 1309, 29–33, build. 1, Nizhegorodskaya st., Moscow, 109052, Russian Federation; kieran.jv.x@gmail.com;

**Nadezhda V. Remizova** — assistant of the Department of Geotechnics; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2 Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; nadevya@yandex.ru.

*Authors' contribution: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare no conflict of interest.*

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 626

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1095-1103

## Экспериментальная проверка динамических характеристик системы измерения пульсационного давления

Генрих Васильевич Орехов<sup>1</sup>, Михаил Константинович Скляднев<sup>1</sup>,  
Александр Федорович Зубков<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (НИИ механики МГУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Динамическое давление измеряется во многих сферах жизнедеятельности человека. Разместить датчик непосредственно в точке приемника давления часто не представляется возможным. Приходится использовать соединительные трубки. Рассматривается диагностика измерительной системы для получения динамических характеристик потока в модели водосбросного тракта гидротурбины. Цель исследования — определение оптимальной длины соединительной трассы и проверка передаточных характеристик используемой измерительной системы.

**Материалы и методы.** Для диагностики измерительной системы создан специальный стенд. Программное обеспечение для обработки сигналов реализовано в среде графического программирования LabVIEW. Алгоритмом преобразования сигналов датчиков из области времени в область частот являлось дискретное преобразование Фурье. В измерительной системе применялись датчики давления XGZP6857A. Использовался аналого-цифровой преобразователь NI USB 6225. Калибровка выполнялась стандартным методом путем проведения «эталонных» экспериментов в аэродинамической установке AeroLab. Эталонным прибором стал дифференциальный цифровой манометр ЭКО-ИНТЕХ ДМЦ-01М.

**Результаты.** По итогам проведенных опытов получены значения пульсаций давления при шести различных длинах соединительных трубок. В экспериментах использовались соединительные трубки следующих длин: 20, 40, 70, 150, 400, 900 мм. Пульсации давления записывались в диапазоне от 0 до 70 Гц с шагом 10 Гц. При дальнейшем анализе сигналов были получены спектры пульсаций давления и зависимости амплитуды пульсаций давления от длины соединительной трубки.

**Выводы.** Описанный стенд может применяться для динамической калибровки датчиков давления в диапазоне частот до 70 Гц при различной длине соединительных трубок. Измерительная система, рассмотренная в статье, может быть использована для получения динамических характеристик потока в модели водосбросного тракта гидротурбины при применении медных соединительных трубок до 400 мм длиной.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** датчик давления, измерение давления, статическая и динамическая калибровка, соединительная трубка, частотный спектр сигнала, измерение пульсационного давления, стенд для динамической калибровки, длина трассы, пульсации давления

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Орехов Г.В., Скляднев М.К., Зубков А.Ф. Экспериментальная проверка динамических характеристик системы измерения пульсационного давления // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 1095–1103. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1095-1103

Автор, ответственный за переписку: Михаил Константинович Скляднев, m.kons20@mail.ru.

## Experimental verification of the dynamic characteristics of the pulsation pressure measurement system

Genrikh V. Orekhov<sup>1</sup>, Mikhail K. Sklyadnev<sup>1</sup>, Alexander F. Zubkov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Dynamic pressure is measured in many areas of human activity. It is often not possible to place a sensor directly at the pressure receiver point. Connecting tubes have to be used. This paper discusses the diagnostics of a measuring system for obtaining dynamic flow characteristics in a model of a hydraulic turbine spillway. The purpose of this study is to determine the optimal length of the pressure connecting line and to check the transfer characteristics of the measuring system used.

**Materials and methods.** A special stand was created for diagnostics of the measuring system. The software for signal processing is implemented in the LabVIEW graphical programming environment. The algorithm for converting sensor signals from the time domain to the frequency domain was the discrete Fourier transform (DFT). The measuring system used pressure sensors XGZP6857A. An analog-to-digital converter (ADC) NI USB 6225 was used. Calibration was performed using the standard method by conducting "reference" experiments in the AeroLab aerodynamic setup. The reference device is the differential digital pressure gauge ECO-INTECH DMC-01M.

**Results.** As a result of the experiments, pressure pulsation values were obtained for 6 different lengths of connecting tubes. The following lengths of connecting tubes were used in the experiments: 20, 40, 70, 150, 400, 900 mm. Pressure pulsations were recorded in the range from 0 to 70 Hz with a step of 10 Hz. During further analysis of the signals, pressure pulsation spectra and the dependence of the pressure pulsation amplitude on the length of the connecting tube were obtained.

**Conclusions.** The setup described in the paper can be used for dynamic calibration of pressure sensors in the frequency range up to 70 Hz with different lengths of connecting tubes. The measuring system discussed in the paper can be used to obtain dynamic characteristics of flow in the model of the hydraulic turbine spillway when copper connecting tubes up to 400 mm long are used.

**KEYWORDS:** pressure transducer, pressure measurement, static and dynamic calibration, connecting tube, signal frequency spectrum, pulsation pressure measurement, dynamic calibration stand, route length, pressure pulsations

**FOR CITATION:** Orekhov G.V., Sklyadnev M.K., Zubkov A.F. Experimental verification of the dynamic characteristics of the pulsation pressure measurement system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):1095-1103. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1095-1103 (rus.).

*Corresponding author:* Mikhail K. Sklyadnev, m.kons20@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Динамическое давление измеряется во многих сферах жизнедеятельности человека: автомобильной промышленности, турбомашиностроении, аэродинамике, гидроэнергетике, различных производственных процессах, медицине и другом. Встречающиеся амплитуды варьируются от нескольких Па до нескольких ГПа, а частоты от менее одного Гц до примерно одного МГц [1–7]. Разместить датчик непосредственно в точке забора давления часто не представляется возможным. Приходится использовать соединительные трубки. Точность динамических измерений давления такой системы начинает сильно зависеть от размеров и геометрии соединительных элементов. Большинство существующих датчиков давления калибруются только на статическое давление [7–11]. Поэтому для измерения пульсаций давления в потоке жидкости нужно проверить динамические характеристики используемой системы сбора данных. В противном случае данные могут быть подвержены влиянию многих системных ограничений в частотных и амплитудных диапазонах сигналов давления, и они не смогут правдиво отражать гидродинамику исследуемого процесса [11–16].

В настоящей статье рассматривается диагностика измерительной системы для получения динамических характеристик потока в модели водосбросного тракта гидротурбины. В связи с особенностями эксперимента и конструкцией модели не было возможности разместить датчики непосредственно в точке забора давления. Поэтому потребовался соединительный элемент, в качестве которого была выбрана медная трубка с внутренним диаметром 1 мм. Рассматривался диапазон частот пульсаций от 0 до 70 Гц.

Цель исследования — определение оптимальной длины соединительного элемента и проверка качества применяемой измерительной системы.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для диагностики измерительной системы создан специальный стенд, схема которого изображена на рис. 1.

Программное обеспечение для обработки сигналов реализовано в среде графического программирования LabVIEW.

Классический подход к спектральному анализу физических процессов основан на применении преобразования Фурье [17–20]:

$$\hat{p}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t)e^{-2\pi if} df,$$

где  $f$  — частота;  $p(t)$  — сигнал;  $t$  — время;  $i$  — мнимая единица.

На практике приходится иметь дело с дискретными сигналами  $p(t_i)$ , полученными с некоторым временным шагом  $\Delta t$ . Алгоритм, который обеспечивает преобразование выборки сигнала из области времени в область частот, является дискретным преобразованием Фурье (ДПФ) [17–20]:

$$\hat{p}(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} p(t_n) e^{-\frac{2\pi i}{N} kn},$$

где  $k$  —  $k$ -й элемент спектральной составляющей;  $N$  — количество временных отсчетов;  $n$  — номер отсчета.

Фактически исходный сигнал представляется в виде ряда Фурье: набора гармоник с частотами, кратными частоте первой гармоники, и амплитудами, определяемыми с помощью преобразования Фурье исходного сигнала в пределах его периода.



Технические характеристики датчика давления XGZP6857A

Technical characteristics of the pressure sensor XGZP6857A

Тип датчика / Sensor type	Интегрированный / Integrated
Тип измеряемого давления / Type of pressure measured	Дифференциальный / Differential
$P_{OP}$ , кПа / kPa	-40/+40
$P_{MAX}$ , кПа / kPa	75
$V_{CC}$ , В / V	4,75-5,25
$T_A$ , °C	0-60
Корпус / Case	1351
Время отклика, мс / Response time, ms	2,5

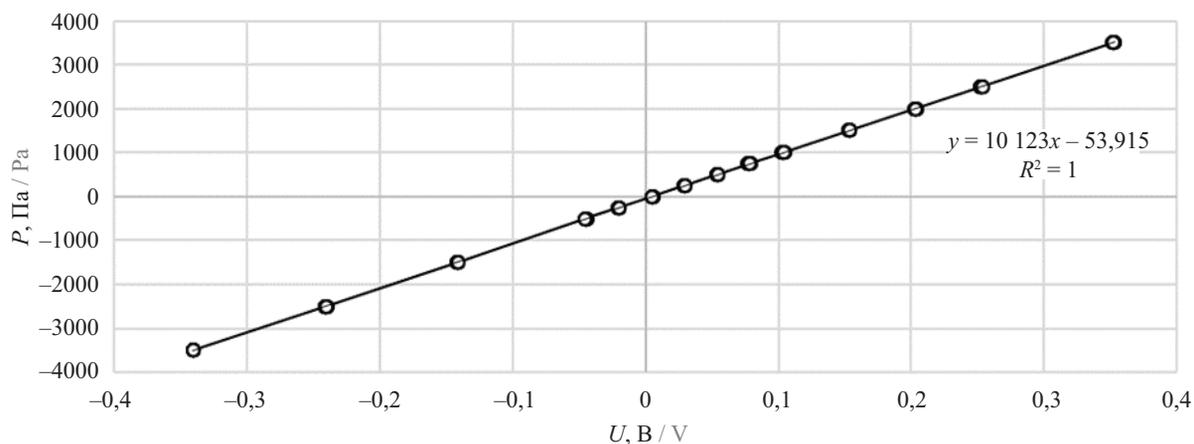


Рис. 3. Тарировочная зависимость одного из датчиков давления

Fig. 3. Calibration dependence of one of the pressure sensors

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

В результате проведенных опытов получены значения пульсаций давления при шести различных длинах соединительных трубок. В экспериментах использовались соединительные трубки следующих длин: 20, 40, 70, 150, 400, 900 мм. Пульсации давления записывались в диапазоне от 0 до 70 Гц с шагом 10 Гц. Амплитудно-частотные характеристики

сигналов шести датчиков давления с различной длиной соединительной трубки от 20 до 900 мм представлены на рис. 4. На графике можно наблюдать фазовое смещение сигналов на датчиках с длиной соединительной трубки 400 и 900 мм. Также можно заметить уменьшение амплитуды пульсаций на длине трубки 900 мм.

График пульсаций давления при частоте 70 Гц приведен на рис. 5.

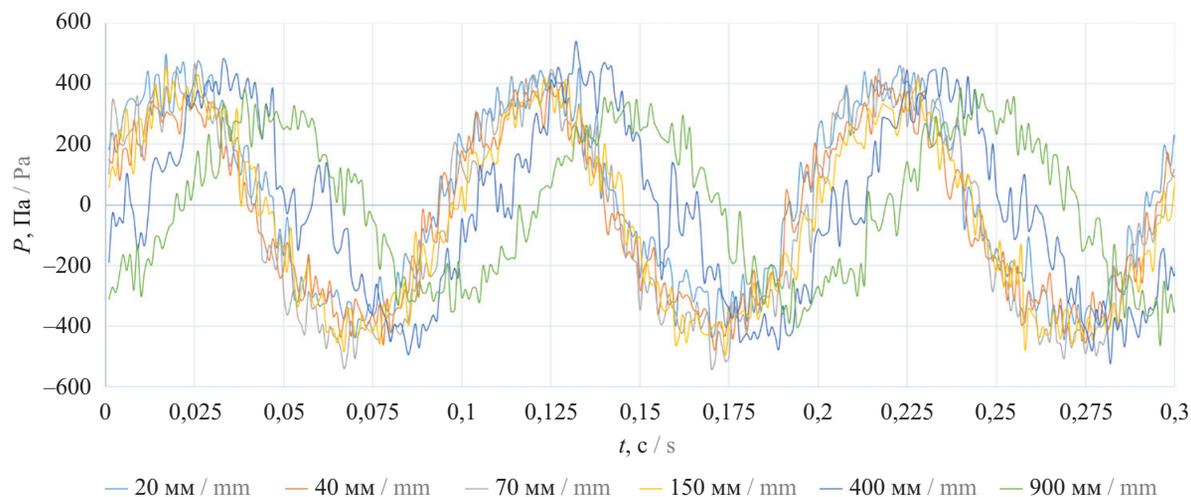


Рис. 4. Пульсации давления на частоте 10 Гц

Fig. 4. Pressure pulsations at a frequency of 10 Hz

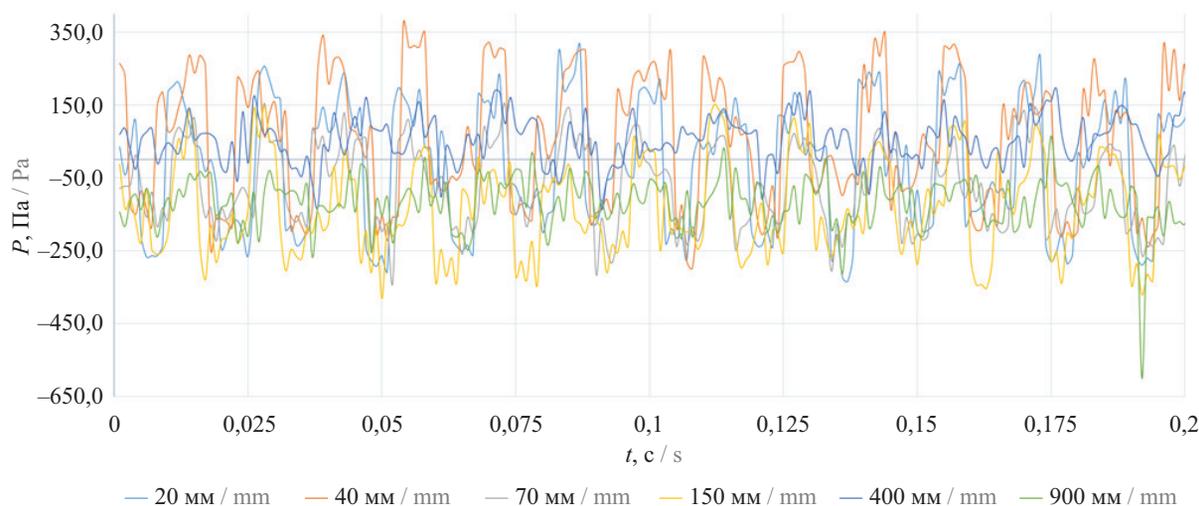


Рис. 5. Пульсации давления на частоте 70 Гц  
 Fig. 5. Pressure pulsations at a frequency of 70 Hz

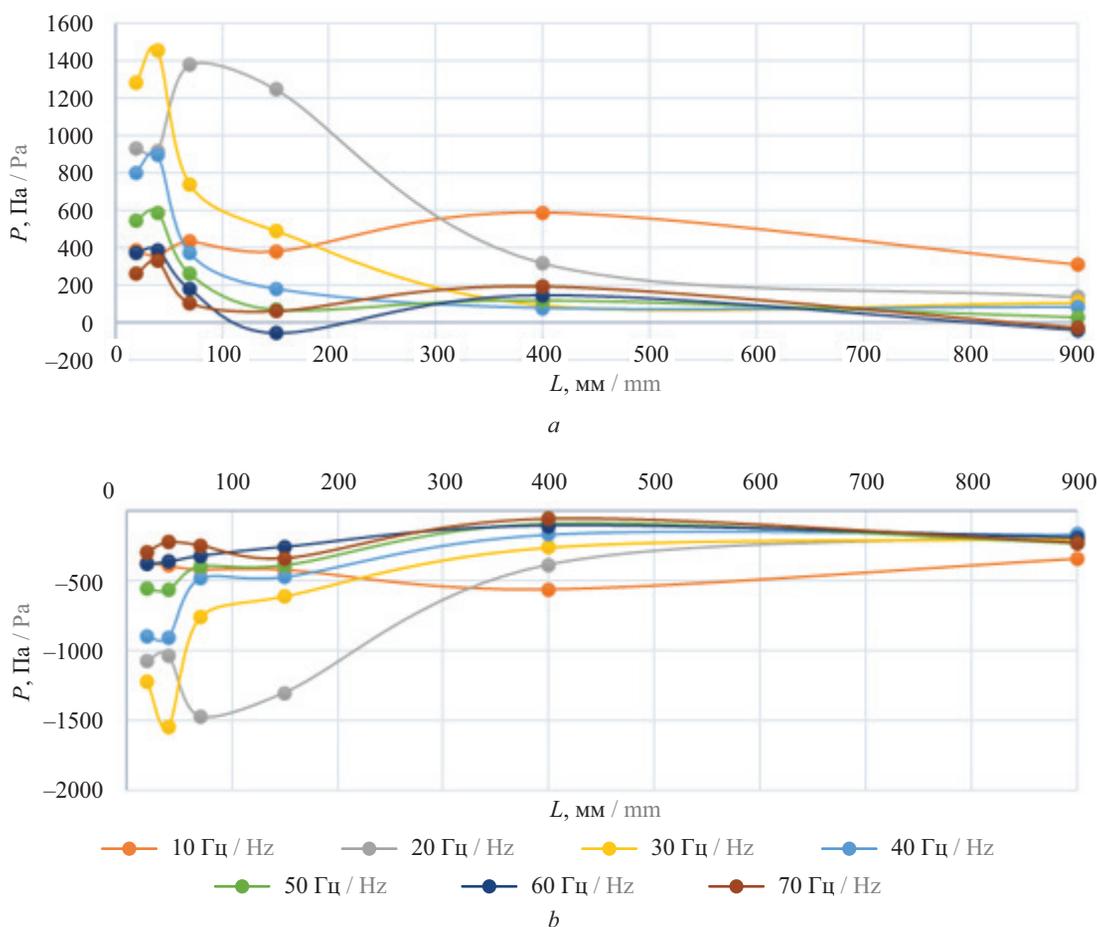
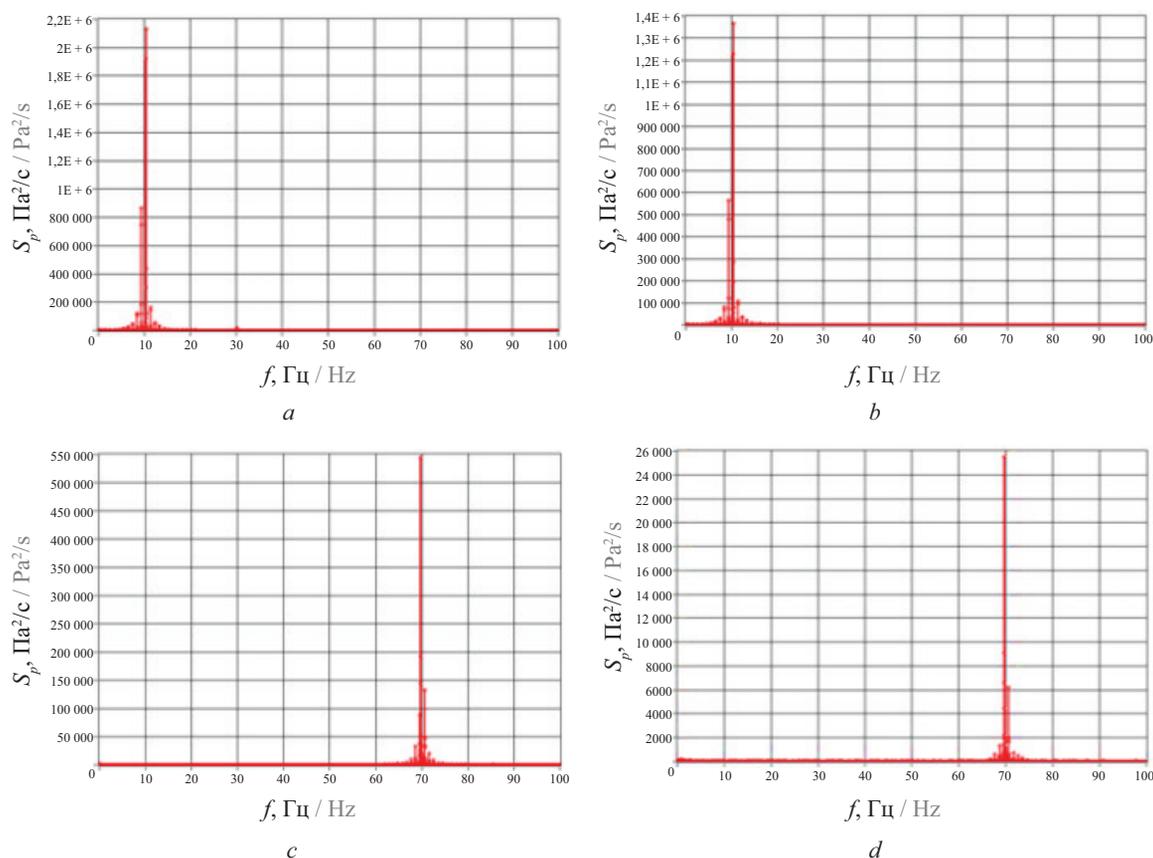


Рис. 6. Графики зависимости среднего давления от длины соединительной трубки: *a* — положительное давление; *b* — отрицательное давление  
 Fig. 6. Graphs of the dependence of average pressure on the length of the connecting tube: *a* — positive pressure; *b* — negative pressure



**Рис. 7.** Спектральная плотность мощности: *a* — длина соединительной трубки 20 мм, частота 10 Гц; *b* — длина соединительной трубки 900 мм, частота 10 Гц; *c* — длина соединительной трубки 20 мм, частота 70 Гц; *d* — длина соединительной трубки 900 мм, частота 70 Гц

**Fig. 7.** Power spectral density: *a* — length of connecting tube 20 mm frequency 10 Hz; *b* — length of connecting tube 900 mm frequency 10 Hz; *c* — length of connecting tube 20 mm frequency 70 Hz; *d* — length of connecting tube 900 mm frequency 70 Hz

На графике (рис. 5), так же как и на предыдущем, отмечается фазовое смещение и уменьшение амплитуды, но его уже можно наблюдать на более коротких трубках длиной 70 и 150 мм.

Проанализировав амплитудно-частотные характеристики, можно утверждать, что с увеличением длины соединительной трубки и частоты сигнала происходят уменьшение амплитуды пульсаций давления и фазовое смещение.

В результате дальнейшего анализа сигналов были получены зависимости амплитуды пульсаций давления от длины соединительной трубки (рис. 6).

Графики на рис. 6 подтверждают вышесказанное. Из них хорошо видно, что максимальную амплитуду пульсаций можно наблюдать при небольшой длине соединительных трубок до 250 мм и частотах от 0 до 50 Гц. При длине соединительных трубок больше 400 мм амплитуда пульсаций начинает мало зависеть от частоты и стремится к нулю. На частотах больше 50 Гц даже на самых коротких трубках амплитуда очень невелика по сравнению с более низкими частотами.

После преобразования выборки сигнала из области времени в область частот вычислена спектральная плотность мощности и построены спектры пульсаций давления (рис. 7).

Анализ графиков спектральной плотности мощности показывает, что на всем диапазоне длин соединительных трубок и генерируемых частот измерительная система улавливает частоту сигнала без искажений. С увеличением длины соединительной трубки и частоты уменьшается мощность сигнала. Уменьшение амплитуды при увеличении частоты возможно из-за особенностей динамика, с помощью которого генерировались пульсации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Описанный в статье стенд может использоваться для динамической калибровки датчиков давления в диапазоне частот до 70 Гц при различной длине соединительных трубок.

На амплитуду пульсаций давления сильно влияет как длина соединительных трубок, так и частота генерируемого сигнала. Максимальную амплитуду пульсаций можно наблюдать при небольшой длине соединительных трубок до 250 мм и частотах от 0 до 50 Гц. При длине соединительных трубок больше 400 мм амплитуда пульсаций начинает мало зависеть от частоты и стремится к нулю. На частотах больше 50 Гц даже

на самых коротких трубках амплитуда очень невелика по сравнению с более низкими частотами.

На всем диапазоне длин соединительных трубок от 20 до 900 мм и генерируемых частот от 0 до 70 Гц измерительная система улавливает частоту сигнала без искажений.

При прохождении сигнала через соединительные трубки длиной от 400 мм можно наблюдать его

фазовое смещение. Это говорит о нежелательном применении медных соединительных трубок длиной более 400 мм на практике.

Измерительная система, рассмотренная в статье, может быть использована для получения динамических характеристик потока в модели водосбросного тракта гидротурбины при применении медных соединительных трубок до 400 мм длиной.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Tey A.J.D., Vicarioli G.G., Rodriguez J.E.M.* Development of a dynamic standard of pressure // 18th International Congress of Metrology. 2017. P. 14002. DOI: 10.1051/metrology/201714002
2. *Gaetani P., Persico G.* Technology Development of Fast-Response Aerodynamic Pressure Probes // International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power. 2020. Vol. 5. Issue 2. P. 6. DOI: 10.3390/ijtp5020006
3. *Amer E., Jönsson G., Arrhen F.* Towards traceable dynamic pressure calibration using a shock tube with an optical probe for accurate phase determination // Metrologia. 2022. Vol. 59. Issue 3. P. 035001. DOI: 10.1088/1681-7575/ac5db5
4. *Kutin J., Svete A.* Connecting volume effects on dynamics of pneumatic pressure measurement systems // ACTA IMEKO. 2020. Vol. 9. Issue 5. P. 315. DOI: 10.21014/acta\_imeko.v9i5.991
5. *Svete A., Kutin J.* Optimal dimensions of connecting tubes for dynamic measurements of pressure // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1065. P. 162006. DOI: 10.1088/1742-6596/1065/16/162006
6. *Pereira J.D.* Pressure Sensors: Working Principles of Static and Dynamic Calibration // Sensors. 2024. Vol. 24. Issue 2. P. 629. DOI: 10.3390/s24020629
7. *Bajsić I., Kutin J., Žagar T.* Response time of a pressure measurement system with a connecting tube // Instrumentation Science & Technology. 2007. Vol. 35. Issue 4. Pp. 399–409. DOI: 10.1080/107391-40701436579
8. *Dos Reis E., de Gaspari C.A.* On measuring dynamic pressure in multiphase flows // 19th International Congress of Mechanical Engineering. 2007.
9. *Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Yin K., Kavuri S.N.* A review of process fault detection and diagnosis // Computers & Chemical Engineering. 2003. Vol. 27. Issue 3. Pp. 293–311. DOI: 10.1016/s0098-1354(02)00160-6
10. *Elgeneidy K., Lohse N., Jackson M.* Bending angle prediction and control of soft pneumatic actuators with embedded flex sensors — a data-driven approach // Mechatronics. 2017. Vol. 50. Pp. 234–247. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2017.10.005
11. *Zeng W., Jacobi I., Beck D.J., Li S., Stone H.A.* Characterization of syringe-pump-driven induced pressure fluctuations in elastic microchannels // Lab on a Chip. 2015. Vol. 15. Issue 4. Pp. 1110–1115. DOI: 10.1039/c4lc01347f
12. *Theodoro F.R.F., da Costa Reis M.L.C., d'Andrade Souto C., de Barros E.* Dynamic calibration of pressure transducers employed in the aerospace sector : a literature survey // 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013). 2013.
13. *Svetea A., Ștefea M., Mačeka A., Kutin J., Bajsić I.* Dynamic pressure generator for dynamic calibrations at different average pressures based on a double-acting pneumatic actuator // Sensors and Actuators A: Physical. 2016. Vol. 247. Pp. 136–143. DOI: 10.1016/j.sna.2016.05.031
14. *Pieniążek J., Ciecinski P., Ficek D., Szumski M.* Dynamic Response of the Pitot Tube with Pressure Sensor // Sensors. 2023. Vol. 23. Issue 5. P. 2843. DOI: 10.3390/s23052843
15. *Kutin J., Svete A.* On the theory of the frequency response of gas and liquid pressure measurement systems with connecting tubes // Measurement Science and Technology. 2018. Vol. 29. Issue 12. P. 125108. DOI: 10.1088/1361-6501/aae884
16. *Li R., Lin S., Ge N., Gao L.* Nonembedded measurement method based on amplitude correction for unsteady surface pressure estimation in a high-subsonic compressor cascade // Measurement. 2023. Vol. 222. P. 113685. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113685
17. *Кузнецов С.А., Мясникова М.Г., Панов А.П., Цыпин Б.В.* Выбор методов спектрального оценивания для системы контроля динамических характеристик датчиков давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2015. № 2 (12). С. 45–51. EDN UKSFCJ.
18. *Бушуев О.Ю.* Применение метода Прони для анализа выходных сигналов преобразователей давления // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2012. № 23 (282). С. 219–221. EDN PBBCTB.
19. *Мясникова Н.В., Панов А.П., Цыпин Б.В.* Система для исследования характеристик датчиков динамического давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 4 (6). С. 32–36. EDN RWVLJT.

20. Бушуев О.Ю., Семенов А.С., Шестаков А.Л. Экспериментальная оценка динамических характеристик тензопреобразователей давления // Вестник

Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2011. № 1 (82). С. 88–97. EDN NDXJPB.

Поступила в редакцию 2 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 8 апреля 2025 г.

Одобрена для публикации 22 мая 2025 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Генрих Васильевич Орехов** — 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; ORCID: 0000-0002-6900-2704; orehov\_genrih@mail.ru;

**Михаил Константинович Скляднев** — преподаватель кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 4021-4471, ORCID: 0000-0003-4188-268X; m.kons20@mail.ru;

**Александр Федорович Зубков** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (НИИ механики МГУ);** 119192, г. Москва, Мичуринский пр-т, д. 1; SPIN-код: 9378-1416, PII ID: 10906, Scopus: 55411829200, ORCID: 0000-0001-8041-5350; 9392998@mail.ru.

Вклад авторов:

Орехов Г.В. — научное руководство, научное редактирование текста, доработка текста.

Скляднев М.К. — идея, сбор и обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Зубков А.Ф. — научное руководство, концепция исследования, научное редактирование текста, доработка текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Tey A.J.D., Vicarioli G.G., Rodríguez J.E.M. Development of a dynamic standard of pressure. *18th International Congress of Metrology*. 2017; 14002. DOI: 10.1051/metrology/201714002
2. Gaetani P., Persico G. Technology Development of Fast-Response Aerodynamic Pressure Probes. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*. 2020; 5(2):6. DOI: 10.3390/ijtp5020006
3. Amer E., Jönsson G., Arrhen F. Towards traceable dynamic pressure calibration using a shock tube with an optical probe for accurate phase determination. *Metrologia*. 2022; 59(3):035001. DOI: 10.1088/1681-7575/ac5db5
4. Kutin J., Svete A. Connecting volume effects on dynamics of pneumatic pressure measurement systems. *ACTA IMEKO*. 2020; 9(5):315. DOI: 10.21014/acta\_imeko.v9i5.991
5. Svete A., Kutin J. Optimal dimensions of connecting tubes for dynamic measurements of pressure. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1065:162006. DOI: 10.1088/1742-6596/1065/16/162006
6. Pereira J.D. Pressure Sensors: Working Principles of Static and Dynamic Calibration. *Sensors*. 2024; 24(2):629. DOI: 10.3390/s24020629
7. Bajsić I., Kutin J., Žagar T. Response time of a pressure measurement system with a connecting tube. *Instrumentation Science & Technology*. 2007; 35(4):399-409. DOI: 10.1080/10739140701436579
8. Dos Reis E., de Gaspari C.A. On measuring dynamic pressure in multiphase flows. *19th International Congress of Mechanical Engineering*. 2007.
9. Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Yin K., Kavuri S.N. A review of process fault detection and diagnosis. *Computers & Chemical Engineering*. 2003; 27(3):293-311. DOI: 10.1016/s0098-1354(02)00160-6
10. Elgeneidy K., Lohse N., Jackson M. Bending angle prediction and control of soft pneumatic actuators with embedded flex sensors — a data-driven approach. *Mechatronics*. 2017; 50:234-247. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2017.10.005
11. Zeng W., Jacobi I., Beck D.J., Li S., Stone H.A. Characterization of syringe-pump-driven induced pressure fluctuations in elastic microchannels. *Lab on a Chip*. 2015; 15(4):1110-1115. DOI: 10.1039/c4lc01347f
12. Theodoro F.R.F., da Costa Reis M.L.C., d'Andrade Souto C., de Barros E. Dynamic calibration of pressure transducers employed in the aerospace sector: a literature survey. *22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*. 2013.
13. Svetea A., Ștefea M., Mačeka A., Kutin J., Bajsić I. Dynamic pressure generator for dynamic calibrations at different average pressures based on a double-acting pneumatic actuator. *Sensors and Actuators A:*

*Physical*. 2016; 247:136-143. DOI: 10.1016/j.sna.2016.05.031

14. Pieniążek J., Ciecinski P., Ficek D., Szumski M. Dynamic Response of the Pitot Tube with Pressure Sensor. *Sensors*. 2023; 23(5):2843. DOI: 10.3390/s23-052843

15. Kutin J., Svete A. On the theory of the frequency response of gas and liquid pressure measurement systems with connecting tubes. *Measurement Science and Technology*. 2018; 29(12):125108. DOI: 10.1088/1361-6501/aae884

16. Li R., Lin S., Ge N., Gao L. Nonembedded measurement method based on amplitude correction for unsteady surface pressure estimation in a high-subsonic compressor cascade. *Measurement*. 2023; 222:113685. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113685

17. Kuznetsov S.A., Myasnikova M.G., Panov A.P., Tsypin B.V. Choice of methods of spectral evaluation

for checking of dynamic descriptions of pressductors. *Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2015; 2(12):45-51. EDN UKSFCJ. (rus.).

18. Bushuev O.Yu. Use of Prony's method when analyzing the signal of a pressure transducer. Bulletin of the South Ural State University. *Series Computer Technology, Automatic Control, Radio Electronics*. 2012; 23(282):219-221. EDN PBBCTB. (rus.).

19. Myasnikova N.V., Panov A.P., Tsypin B.V. System for research of characteristics of sensors dynamic civil pressure. *Measuring. Monitoring. Management. Control*. 2013; 4(6):32-36. EDN RWVLJT. (rus.).

20. Bushuev O.Y., Semenov A.S., Shestakov A.L. Experimental evaluation of dynamic characteristics of pressure strain gauge transducers. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. *Series Instrument Engineering*. 2011; 1(82):88-97. EDN NDXJPB. (rus.).

Received March 2, 2025.

Adopted in revised form on April 8, 2025.

Approved for publication on May 22, 2025.

**B I O N O T E S:** **Genrikh V. Orekhov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6900-2704; orehov\_genrih@mail.ru;

**Mikhail K. Sklyadnev** — lecturer of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 4021-4471, ORCID: 0000-0003-4188-268X; m.kons20@mail.ru;

**Alexander F. Zubkov** — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior research fellow; **Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University**; 1 Michurinsky prospect, Moscow, 119192, Russian Federation; SPIN-code: 9378-1416, ID RSCI: 10906, Scopus: 55411829200, ORCID: 0000-0001-8041-5350; 9392998@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Genrikh V. Orekhov* — scientific leadership, scientific text editing, text revision.

*Mikhail K. Sklyadnev* — idea, collection of material, processing of material, writing the original text, final conclusions.

*Alexander F. Zubkov* — scientific leadership, research concept, scientific text editing, text revision.

*The authors declare no conflicts of interests.*

## Энергетическая эффективность электрических котлов автономных индивидуальных систем теплоснабжения

Алексей Леонидович Торопов<sup>1</sup>, Самвел Володяевич Саргсян<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»); г. Москва, Россия;

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Электрические водяные котлы — один из вариантов тепловых генераторов, применяемых в автономных системах теплоснабжения. По сравнению с традиционными тепловыми генераторами на углеводородном топливе, они дешевле, проще в эксплуатации и монтаже, безопаснее. В ряде регионов страны тарифы на электрическую энергию позволяют им конкурировать с традиционными котлами по экономическим показателям. Цель исследования — определить и сравнить показатели энергетической эффективности электрических тепловых генераторов с разными типами камер нагрева с теплоносителями вода, антифриз; оценить возможность запуска системы теплоснабжения из переохлажденного состояния.

**Материалы и методы.** Исследования носят экспериментальный характер, испытания проведены на исследовательском стенде завода «Ардерия». Установлены характеристики энергетической эффективности электрических тепловых генераторов с объемной камерой нагрева с нагревательными элементами, контактирующими с теплоносителем и проточной камерой косвенного поверхностного нагрева. Выполнены испытания запуска системы в морозильной камере.

**Результаты.** Определены коэффициенты энергетической эффективности исследуемых образцов электрических тепловых генераторов, составившие в среднем 93,5 % для объемных камер нагрева и 0,97 % для камер проточного типа. Классифицированы составляющие тепловых потерь электрических генераторов. Применение антифризов снижает показатели энергетической эффективности тепловых генераторов на 2,1 %. Подтверждена возможность запуска системы теплоснабжения с электрическим тепловым генератором с проточной камерой нагрева из переохлажденного состояния с температурой –16 °С.

**Выводы.** Результаты исследования показали существенные преимущества электрических тепловых генераторов с камерой нагрева проточного типа с косвенным поверхностным нагревом над тепловыми электрическими генераторами с объемной камерой нагрева.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** электрический котел, энергетическая эффективность, электрический нагревательный элемент, теплоноситель, антифриз, тепловые потери

**Благодарности.** Авторы благодарят рецензентов за замечания по стилю изложения и научно-технической сути, способствующие более глубокому раскрытию темы научной работы.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Торопов А.Л., Саргсян С.В. Энергетическая эффективность электрических котлов автономных индивидуальных систем теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 7. С. 1104–1112. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1104-1112

**Автор, ответственный за переписку:** Алексей Леонидович Торопов, toropov@aprilgroup.ru.

## Energy efficiency of electric boilers of autonomous individual heat supply systems

Alexey L. Toropov<sup>1</sup>, Samvel V. Sargsyan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Engineering Center “April”; Moscow, Russian Federation;

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

### ABSTRACT

**Introduction.** Electric water boilers are one of the options for heat generators used in autonomous heat supply systems. Compared to traditional heat generators on hydrocarbon fuel, they are cheaper, easier to operate and install, and safer. In a number of regions of the country, electricity tariffs allow them to compete with traditional boilers in terms of economic indicators. The purpose of the work — to determine and compare the energy efficiency indicators of electric heat generators with different types of heating chambers with water and antifreeze coolants. To assess the possibility of starting the heat supply system from a supercooled state.

**Materials and methods.** The research is experimental in nature, the tests were conducted on the research stand of the “Arderia” plant. The characteristics of the energy efficiency of electric heat generators with a volumetric heating chamber with

heating elements in contact with the coolant and a flow chamber of indirect surface heating were determined. Tests of starting the system in a freezer were conducted.

**Results.** The energy efficiency coefficients of the studied samples of electric heat generators were determined, amounting to an average of 93.5 % for volumetric heating chambers and 0.97 % for flow-type chambers. The components of heat losses of electric generators were classified. The use of antifreezes reduces the energy efficiency of heat generators by 2.1 %. The possibility of starting a heat supply system with an electric heat generator with a flow-type heating chamber from a supercooled state with a temperature of minus 16 °C was confirmed.

**Conclusions.** The results of the study showed significant advantages of electric heat generators with a flow-type heating chamber with indirect surface heating over thermal electric generators with a volumetric heating chamber.

**KEYWORDS:** electric boiler, energy efficiency, electric heating element, heat carrier, antifreeze, heat loss

*Acknowledgements.* The authors thank the reviewers for their comments, both in terms of the style of presentation and the scientific and technical essence, which contribute to a deeper disclosure of the topic of scientific work.

**FOR CITATION:** Toropov A.L., Sargsyan S.V. Energy efficiency of electric boilers of autonomous individual heat supply systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(7):1104-1112. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.7.1104-1112 (rus.).

*Corresponding author:* Alexey L. Toropov, toropov@aprilgroup.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Главными факторами, определяющими выбор теплового генератора автономных индивидуальных систем теплоснабжения, являются стоимость энергии и удобство эксплуатации оборудования. С точки зрения экологии и техногенного воздействия на атмосферу Земли внимание нацелено на величину эмиссии парниковых газов, выделяемых при работе систем теплоснабжения. Важны также вопросы безопасности эксплуатации инженерных сетей и оборудования. В качестве источника сырья с целью производства тепловой энергии для автономных систем теплоснабжения наибольшее распространение получили: природный газ, жидкое и твердое углеводородное топливо, электрическая энергия. Полезная доля энергии, реализуемая для нагрева теплоносителя систем теплоснабжения, устанавливается коэффициентом энергетической эффективности теплового генератора.

Научно обоснованное решение о выборе видов топлива для автономной системы теплоснабжения объектов должно базироваться на полноценных исследованиях энергетической эффективности автономных систем теплоснабжения с учетом масштаба объекта, его локации, режимов работы. Использование электрической энергии для автономного теплоснабжения объектов до настоящего времени осуществлялось в незначительных объемах. Это обусловлено тем, что в первичном виде, готовом к применению, электричество в природе отсутствует. Оно получается в результате преобразования первичного энергетического продукта (углеводородное топливо, энергия движения воды, возобновляемая энергия, атомная энергия). Коэффициент преобразования углеводородного топлива в электроэнергию составляет 0,3–0,65 [1, 2]. Указанные значения — основная причина высоких тарифов на электроэнергию и,

как итог, широкое применение углеводородного топлива в автономных системах теплоснабжения.

Изменения, связанные с важностью оценки техногенных факторов развития общества, в приоритетах экологических аспектов воздействия на атмосферу Земли, тенденциях роста размеров городов и городского населения, старения централизованных сетей теплоснабжения, актуальности вопросов безопасности эксплуатации систем теплоснабжения многоквартирных домов и объектов индивидуального строительства, актуализируют научные исследования в области водяного электрического автономного теплоснабжения. Оно дешевле в строительстве, безопаснее и проще в эксплуатации. В ряде регионов Российской Федерации стоимость электрической энергии, например для Иркутской области, составляет для городского населения 1,58 руб. за киловатт в первом диапазоне потребления, равном 7020 кВт·ч в месяц, для сельской местности аналогичный тариф составляет 1,106 руб.<sup>1</sup> Данные тарифы практически соответствуют тарифам на централизованное предоставление тепловой энергии в регионе<sup>2</sup>. В Республике Беларусь стоимость тарифов для выделенного электрического теплоснабжения объектов нового строительства ниже тарифов на централизованное теплоснабжение в 2,2 раза<sup>3</sup>. Существуют также условия строительства объектов в горной местности, с удалением от магистралей сетевого теплоснабжения и газопроводов, при которых теплоснабжение на базе электрических водяных тепловых генераторов является актуальным. Ряд авторов рассматривают электрические котлы как важный элемент энергетического перехода с углеводородного топлива на энергию возобновляемых источников [3, 4].

Теме применения электроэнергии для систем теплоснабжения посвящены работы [5–10]. Электрические нагревательные элементы, основанные

<sup>1</sup> С 1 января 2025 года жители городов Иркутской области будут оплачивать электроэнергию по сельскому тарифу. URL: <https://www.irk.ru/news/20241210/rate/>

<sup>2</sup> Тарифы на тепловую энергию для ООО «Байкальская энергетическая компания» с 1 июля 2024. URL: <https://sbyt.irkutskenergo.ru/qa/6950.html>

<sup>3</sup> Цены на электроэнергию в Беларуси 2025. URL: <https://ru.tarifas.lt/цены-на-электроэнергию-в-беларуси-2025/>

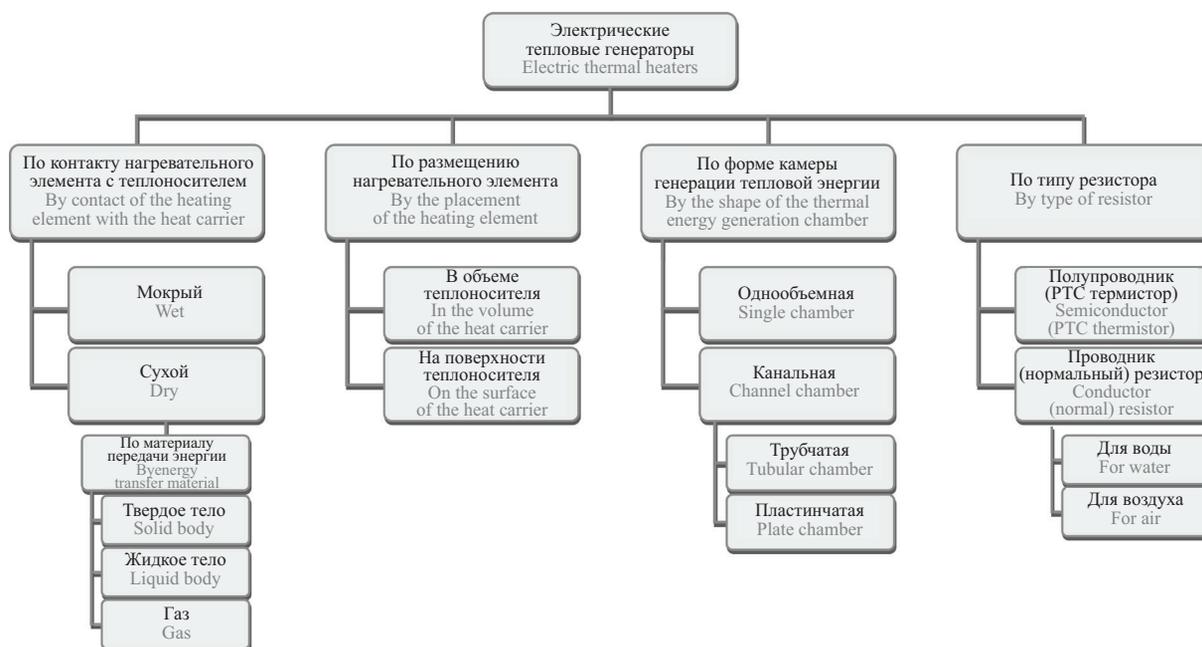


Рис. 1. Классификация устройств генерации тепловой энергии с использованием способа джоулевого нагрева теплоносителя

Fig. 1. Classification of thermal energy generation devices using the Joule heating method of the heat carrier

на принципе джоулевого (резисторного) нагрева при протекании электрического тока, — наиболее популярный вариант, используемый в водяных котлах. По сравнению с другими принципами нагрева теплоносителя в тепловом генераторе (индукционный, прямого нагрева), джоулевый (резисторный) нагрев обладает следующими преимуществами:

- статистика использования в течение столетнего применения;
- низкий уровень шума при работе;
- применим к жидкостным теплоносителям различного типа;
- минимальные размеры;
- простота регулирования мощности и системы управления нагрузками;
- высокая надежность и ремонтпригодность;
- низкая стоимость.

Общая классификация применения электрических котлов для систем теплоснабжения представлена в публикации [11], классификация устройств генерации тепловой энергии на основе джоулевого нагрева приведена на рис. 1 [12].

Практика применения электрических котлов для систем теплоснабжения индивидуальных многоквартирных домов содержит случаи использования незамерзающих теплоносителей (антифризов). Применение антифризов в системах теплоснабжения рассматривалось в трудах [12–16]. Результатом этих исследований является заключение о необходимости значительной корректировки режимов циркуляции теплоносителя в отопительном контуре системы

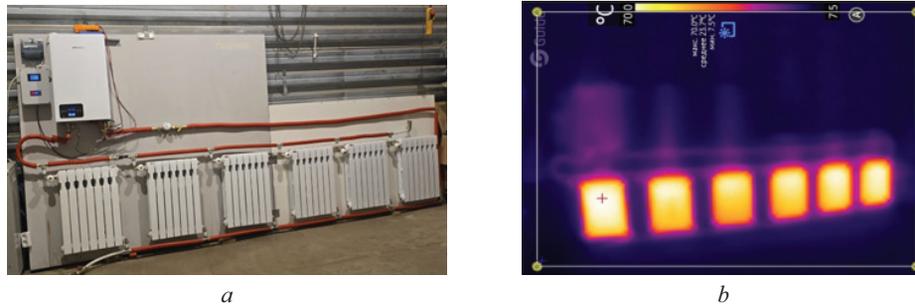
теплоснабжения в связи с существенным отличием вязкости антифризов, их теплоемкости и теплопроводности по сравнению с водой. Исследования работы водяных электрических тепловых генераторов проводились для вариантов конструкции камеры нагрева теплоносителя объемного типа, представляющей собой емкость, заполненную теплоносителем, с расположенными внутри нее нагревательными элементами в виде трубчатых электрических нагревателей, непосредственно контактирующих с теплоносителем и нагревающих его [17–21]. В последние годы широкое распространение в автономных системах теплоснабжения получили тепловые электрические генераторы проточного типа косвенного поверхностного нагрева теплоносителя<sup>4</sup>.

Цель исследования — получение экспериментальных данных и сравнение коэффициентов энергетической эффективности электрических водяных генераторов с камерами генерации тепловой энергии объемного и проточного типов; определение влияния напряжения электрического тока, вида жидкостного теплоносителя, составных частей потерь тепловой энергии и их значений при работе электрических тепловых генераторов, влияния типов теплоносителя (антифриз – вода) на показатели энергетической эффективности теплового генератора.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Испытания работы электрических тепловых генераторов осуществлялись на исследовательском стенде завода «Ардерия». В состав стенда входит

<sup>4</sup> АРДЕРИЯ настенный электрический котел. Руководство по эксплуатации. URL: <https://www.c-o-k.ru/library/instructions/arderia/elektricheskie-kotly/35067/126284.pdf>



**Рис. 2.** Испытательный стенд определения энергетической эффективности электрических котлов: *a* — фото стенда; *b* — съемка стенда тепловизором

**Fig. 2.** Test bench for determining the energy efficiency of electric boilers: *a* — photo of the bench; *b* — shooting the bench with a thermal imager

ли исследуемый электрический тепловой водяной генератор, циркуляционный контур утилизации тепловой нагрузки в виде двухтрубной системы с шестью радиаторами отопления по семь секций каждый. Распределение потоков выполнено с помощью балансировочных кранов. Метод контроля распределения потоков — тепловизор. Вид стенда и съемка тепловизором показаны на рис. 2.

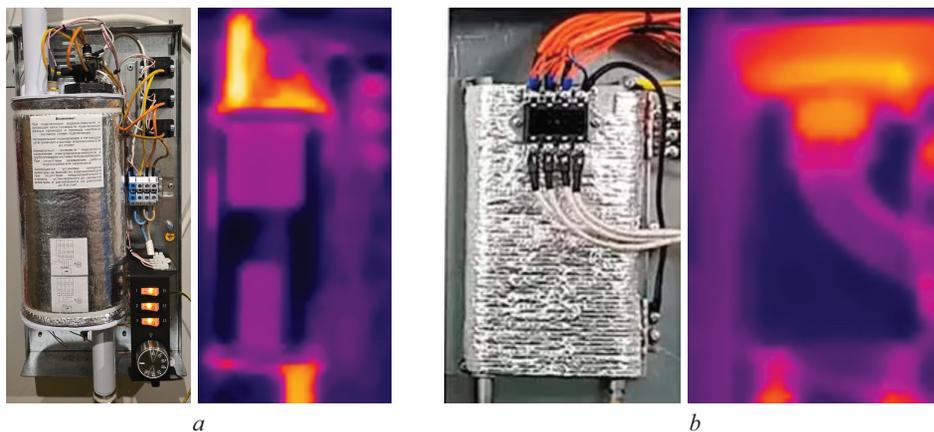
Объектом исследования также были камеры нагрева электрических котлов объемного типа в расположенными внутри трубчатыми электрическими нагревательными элементами, контактирующие с теплоносителем по всей поверхности нагрева (камера котла ЗОТА Баланс 3), и камера нагрева в виде проточного змеевика, залитого в алюминиевую форму совместно с нагревательными элементами трубчатой формы с косвенным поверхностным нагревом змеевика без контакта с теплоносителем. Боковые поверхности обеих камер покрыты слоем теплоизоляционного материала с отражающей алюминизированной поверхностью. Внешний вид камер нагрева представлен на рис. 3.

Измерение и фиксация температуры на входе и выходе из камер проводились с помощью измери-

теля температуры 2-канального НехМіх НМ-3008Д, расход контура циркуляции определялся с помощью счетчика воды Эконом СВ 20-130, контроль напряжения, тока и мощности — электросчетчиком Меркурий 200.02 5-60А/230В кл. т. 1,0. Измерения выполнялись для установившихся режимов теплообмена. Испытания осуществлялись отдельно для напряжения сети 200 и 230 В. При сравнительных испытаниях различных камер нагрева в качестве теплоносителя системы отопления использовалась вода. При изучении параметров энергетической эффективности при применении антифризов испытания проводились для камеры нагрева котла Ардерия Е4. В качестве теплоносителя — антифриза испытания выполнялись для теплоносителя Thermagent-30С Есо на основе пропиленгликоля.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Замеры проводились на трех скоростях работы циркуляционного насоса. Результаты испытаний представлены в таблице, как средние значения по трем скоростям работы циркуляционного насоса, для получения целостной картины технических параметров.



**Рис. 3.** Камеры нагрева теплоносителя электрических котлов и фиксация тепловых полей тепловизором при работе котлов в установившемся режиме: *a* — Зота баланс 3; *b* — Ардерия Е4

**Fig. 3.** Heat transfer fluid heating chambers of electric boilers and fixation of thermal fields by thermal imager during the boilers operation in steady-state mode: *a* — Zota balance 3; *b* — Arderia E4

Энергетические характеристики испытания камер нагрева электрических котлов

Energy characteristics of testing heating chambers of electric boilers

Характеристики / Characteristics	АРДЕРИЯ Е4 (4 кВт) ARDERIA E4 (4 kW)		ЗОТА БАЛАНС 3 (3 кВт) ZOTA BALANCE 3 (3 kW)	
	200 В / V	230 В / V	200 В / V	230 В / V
Мощность потребления, Вт Power consumption, W	3388	4480	2604	3380
Циркуляционный насос, Вт Circulation pump, W	42	49	41	48
Блок электроники, Вт Electronics unit, W	4,2	5,1	4,2	5,5
Блок нагрева, Вт Heating unit, W	95	80	135	150
Коэффициент энергоэффективности КПД, % Energy efficiency coefficient, %	96	97,5	93	94

Результаты испытаний показывают значительную зависимость мощности электрических котлов от напряжения. Разница составляет при напряжениях 200 и 230 В 1,3 раза. Определены основные составляющие общих тепловых потерь при анализе энергетической эффективности электрического теплового генератора. Энергетическая эффективность электрического водяного теплового генератора рассчитывается из уравнения теплового (энергетического) баланса в установившемся режиме работы:

$$Q_p/p = Q_1 + \sum Q_n,$$

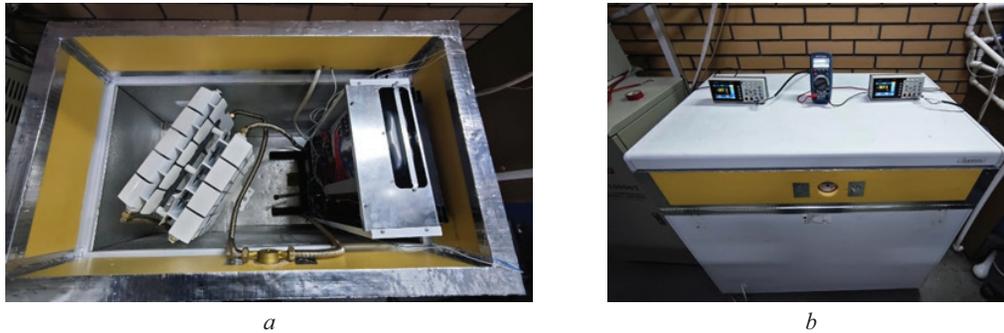
где  $Q_p$  — располагаемая (подведенная) электрическая энергия, Вт·ч;  $Q_1$  — полезная энергия теплоснабжения, Вт·ч;  $Q_1 = C \cdot M(t_n - t_o)$ , где  $C$  — теплоемкость теплоносителя;  $M$  — масса;  $t_n$  — температура напорной магистрали на выходе из котла;  $t_o$  — температура обратной магистрали после снятия тепловой нагрузки на входе в котел;  $\sum Q_n$  — общие потери энергии при работе теплового генератора, Вт·ч;  $\sum Q_n = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$ , где  $Q_2$  — потери энергии при работе системы управления работой котла (электронные платы управления, алгоритм, передача данных), Вт·ч;  $Q_3$  — потери энергии на управление электрической мощностью теплового генератора, Вт·ч;  $Q_4$  — потери энергии на обеспечение циркуляции теплоносителя, Вт·ч;  $Q_5$  — потери энергии на нагрев окружающей среды, Вт·ч.

Отношение полезно используемого тепла  $Q_1$  к располагаемому теплу  $Q_p$  представляет собой коэффициент полезного действия — КПД (коэффициент энергетической эффективности).

Предлагается выделить отдельно показатель  $Q_3$  в связи с тем, что в электрических тепловых генераторах применяются разные устройства управления мощностью, такие как электромеханические реле (Зота) и симисторы (Ардерия). Электромеханические реле обладают небольшим током управления переключения нагрузкой, но имеют ограниченный срок службы и звуковой эффект при срабатывании. Электронные реле (симисторы) имеют практически неограничен-

ный срок службы, бесшумны в работе, но требуют охлаждения. Конструкция системы охлаждения симисторов в котле Ардерия интегрирована в трубопровод обратной магистрали теплового генератора (запатентованное решение). Охлаждение симисторов происходит за счет нагрева теплоносителя. Таким образом, процесс охлаждения симисторов совершает полезную работу по нагреву теплоносителя и повышает коэффициент энергетической эффективности котла Ардерия Е4 на 0,5 %. Величина тепловой энергии, выделяемой на симисторах, составляет 4–5 Вт/кВт мощности нагревательного элемента. Мощность блоков управлением работой котла — 4–6 Вт, циркуляционных насосов в зависимости от скорости вращения ротора — 30–60 Вт. Камера нагрева объемного типа с трубчатыми нагревательными элементами имеет потери тепловой энергии в 1,5–2 раза больше, чем камера проточного типа из-за больших геометрических размеров. В целом испытанные электрические котлы показали высокие значения коэффициентов энергетической эффективности. Для конструкций с объемной камерой нагрева коэффициент энергетической эффективности равен 0,935 (93,5 %), для конструкций проточных камер нагрева 0,97 (97 %). Данные значения можно принять как средние во всем диапазоне изменения напряжений электрической питающей сети (190–240 В) и расходов теплоносителя в системах индивидуального теплоснабжения от 0,3 до 1,2 м<sup>3</sup>/ч при мощности электрических котлов с джоулевым электрическим нагревом до 25 кВт·ч.

Камера нагрева объемного типа, заполненная теплоносителем, с нагревательными элементами имеет габаритные размеры, суммарный вес значительно больше, чем у камеры нагрева проточного типа с косвенным поверхностным нагревом. Камеры объемного типа обладают большей тепловой инерционностью, отрицательно влияющей на способность системы быстро реагировать на команды алгоритмов, управляющих работой систем теплоснабжения. В камерах нагрева объемного типа применяются трубчатые нагревательные электрические



**Рис. 4.** Морозильный блок испытания старта работы системы отопления с электрическим котлом Ардерия Е4 из переохлажденного состояния с начальной температурой  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$

**Fig. 4.** Freezing unit for testing the start of the heating system with the Arderia E4 electric boiler from a supercooled state with an initial temperature of  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$

элементы, контактирующие с теплоносителем водяного типа с плотностью нагрева  $5\text{--}7\text{ Вт/см}^2$ . В камерах нагрева проточного типа с косвенным поверхностным нагревом нет контакта нагревательных элементов с теплоносителем, что позволяет применять трубчатые нагревательные электрические элементы с удельной плотностью нагрева  $15\text{--}30\text{ Вт/см}^2$ . Применение указанных нагревательных элементов дало возможность создания камер нагрева проточного типа с косвенным поверхностным нагревом с удельной мощностью  $10\text{ кВт}\cdot\text{ч/дм}^3$ .

Использование антифризов в качестве теплоносителей автономных систем теплоснабжения с применением электрического теплового генератора с джоулевым нагревом исследовалось в двух аспектах: оценка значений коэффициента энергетической эффективности при использовании антифриза в качестве теплоносителя по сравнению с водой и старт системы теплоснабжения из переохлажденного состояния с отрицательной температурой. В испытаниях в качестве теплоносителя использовался антифриз Thermagent 30C Eco на основе пропиленгликоля с кинематической вязкостью при  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$   $1,114\text{ мм}^2/\text{с}$  и  $5,627$  при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , теплоемкостью  $3797\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ . Испытания проводились без изменения конструкции стенда и настроек балансировочных кранов радиаторов отопления по сравнению с испытаниями с теплоносителем вода для системы отопления с электрическим котлом с проточной камерой нагрева котла Ардерия Е4. Результаты испытаний показали, что при установившемся режиме работы системы отопления на стенде при условиях, идентичных испытаниям с теплоносителем вода, при температуре в напорной магистрали  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  при применении в качестве теплового генератора электрического котла Ардерия Е4, среднее значение коэффициента энергетической эффективности при испытаниях на трех скоростях работы циркуляционного насоса составило  $94,9\%$ , что на  $2,1\%$  ниже значений данного параметра, чем при использовании в качестве теплоносителя воды. Испытания запуска работы системы отопления из переохлажденного состояния проводились в морозильном блоке. На рис. 4 представле-

ны фотографии морозильного блока с установленным в нем электрическим котлом Ардерия Е4, трубопроводами и секциями радиаторов отопления. Начальная температура при старте работы системы отопления составляла  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Измерения осуществлялись по следующим параметрам: расход контура циркуляции, температур на напорной и обратной магистралях котла, характеристик электрической сети питания котла, токов потребления циркуляционного насоса. Результаты испытаний положительные. Система отопления показала способность выполнять старт из переохлажденного состояния и постепенный выход на номинальный режим работы. Время выхода значения тока обмотки статора циркуляционного насоса на установившееся значение составило 2 мин. В период старта системы замечено кратковременное увеличение на  $40\%$  тока обмотки статора циркуляционного насоса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования параметров энергетической эффективности электрических тепловых водяных генераторов двух типов камер нагрева теплоносителя показали существенные преимущества тепловых генераторов с камерой проточного типа с косвенным поверхностным нагревом перед камерой объемного типа. В зависимости от мощности теплового генератора средний коэффициент энергетической эффективности у тепловых генераторов с камерой проточного типа составляет  $97\%$ , у электрических генераторов с камерой нагрева объемного типа  $93,5\%$ . По результатам испытаний определены значения составных частей тепловых потерь электрического теплового генератора. Основную долю тепловых потерь составляет  $Q_5$  — потери энергии на нагрев окружающей среды. Потери энергии (параметр  $Q_3$ ) на управление электрической мощностью теплового генератора в варианте симисторного исполнения, величина которой составляет  $4\text{--}5\text{ Вт/кВт}$  мощности электрического котла, может быть использована для нагрева теплоносителя, добавляя  $0,5\%$  показателям энергетической эффективности систе-

мы отопления. Применение антифризов в системе теплоснабжения сказывается на технических параметрах системы. В условиях испытательного стенда с короткими длинами трубопроводов и минимальным количеством соединительных элементов при одинаковых циркуляционных насосах, работающих при одинаковом напряжении электрической сети, отличие коэффициента энергетической эффективности составило  $-2,1\%$ . Исследования запуска электрического котла Ардерия Е4 с камерой нагрева

проточного типа косвенного поверхностного нагрева из переохлажденного состояния с температурой  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ , проведенные в морозильной камере, продемонстрировали возможность такого старта с постепенным выходом на установившийся режим работы без конструктивных изменений котла, что подтвердило вероятность удаленного запуска котла с камерой нагрева данного типа при периодическом использовании системы отопления в зимний период времени года при применении антифризов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Стертюков К.Г., Стародубцева О.А.* Проблемы внедрения новых технологий и технических средств с целью увеличения КПД в энергетической отрасли // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 25. С. 58–73. EDN UOAKVZ.

2. *Торопов А.Л.* Классификация электрических котлов резистивного нагрева автономных водяных систем теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 10. С. 1608–1616. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1608-1616

3. *Bloess A., Schill W.P., Zerrahn A.* Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials // Applied Energy. 2018. Vol. 212. Pp. 1611–1626. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.073

4. *Pieper C.* Transformation of the German energy system — Towards photovoltaic and wind power Technology Readiness Levels 2018 : PhD Dissertation. Technische Universität Dresden, 2018. 264 p.

5. *Hegazy A.A., Diab M.R.* Performance of an improved design for storage-type domestic electrical water-heaters // Applied Energy. 2002. Vol. 71. Issue 4. Pp. 287–306. DOI: 10.1016/S0306-2619(02)00006-5

6. *Lee S., Jang D., Chung Y.S., Lee S.* Cost-effective and highly efficient surface heating elements using high thermal conductive carbon fibers // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2020. Vol. 137. P. 105992. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105992

7. *Пшеничников В.* Коммерческие водонагреватели на предприятиях // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2011. № 6 (114). С. 40–43. EDN RHVZSV.

8. *Горкин А.П.* Энциклопедия «Техника». М. : Росмэн, 2006. 488 с.

9. *Белавин Ю.А., Евстигнеев М.А., Чернявский А.Н.* Трубчатые электрические нагреватели и установки с их применением. М. : Энергоатомиздат, 1989. 157 с.

10. *Торопов А.Л.* Энергетическая эффективность электрического котла с косвенным поверхностным резисторным нагревом теплоносителя //

Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 6. С. 927–934. DOI: 10.22227/19970935.2023.6.927-934

11. *Maruf N.I., Morales-Espana G., Sijm J., Helisto N., Kiviluoma J.* Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems : a review // Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 53. P. 102553. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102553

12. *Muniak D.P.* The impact of the use of antifreeze substances on the heating installation thermohydraulic parameters and energy consumption // Heat Transfer Engineering. 2021. Vol. 42. Issue 3–4. Pp. 347–353. DOI: 10.1080/01457632.2019.1699305

13. *Serkani G., Poncet S.* Ethylene- and propylene-glycol based nanofluids : a Literature review on their thermophysical properties and thermal performances // Applied Sciences. 2018. Vol. 8. Issue 11. P. 2311. DOI: 10.3390/app8112311

14. *Хаванов П.А., Барынин К.П.* Особенности применения водногликолевых теплоносителей в автономных системах теплоснабжения // АВОК. 2003. № 7.

15. *Хаванов П.А.* Теплотехнические условия использования водногликолевых теплоносителей в автономных системах теплоснабжения // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2003. № 8.

16. *Гольяев О.М.* Применение антифризов в системах отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха // АВОК. 2012. № 6. С. 46–55. EDN PBWOCR.

17. *Taileb A.* A comparative study of a direct current heating system and a gas furnace heating coil // WEENTECH Proceedings in Energy. 2019. Pp. 185–194. DOI: 10.32438/WPE.3019

18. *Hegazy A., Diab M.R.* Performance of an improved design for storage-type domestic electrical water-heaters // Applied Energy. 2002. Vol. 71. Issue 4. Pp. 287–306. DOI: 10.1016/S0306-2619(02)00006-5

19. *Lee S., Jang D., Chung Y.S., Lee S.* Cost-effective and highly efficient surface heating elements using high thermal conductive carbon fibers // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2020. Vol. 137. P. 105992. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105992

20. *Boldrini A., Jiménez Navarro J.P., Crijns-Graus W.H.J., van den Broek M.A.* The role of dis-

strict heating systems to provide balancing services in the European Union // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 154. P. 111853. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111853

21. Пилипенко А.И. Промышленные электронагреватели // *Промышленный электрообогрев и электроотопление*. 2012. № 1. С. 28–34. EDN YWDUPQ.

Поступила в редакцию 3 апреля 2025 г.

Принята в доработанном виде 12 мая 2025 г.

Одобрена для публикации 12 мая 2025 г.

**ОБ АВТОРАХ:** Алексей Леонидович Торопов — кандидат технических наук, генеральный директор — главный конструктор; Инженерный центр «Апрель» (ИЦ «Апрель»); 105122, г. Москва, Щелковское шоссе, д. 13; РИНЦ ID: 1030472, Scopus: 58406665800, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru;

Самвел Володяевич Саргсян — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, директор Научно-образовательного центра «Теплогазоснабжение и вентиляция» (НОЦ «ТГВ»); Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); РИНЦ ID: 429896, Scopus: 57204373040, ORCID: 0000-0003-3356-9116; sargsyansv@mgsu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Stertyukov K.G., Starodubtseva O.A. Problems of introduction of new technologies and technical tools to increase efficiency in the energy sector. *PNRPU Bulletin. Electrical engineering, information technology, control systems*. 2018; 25:58-73. EDN UOAKVZ. (rus.).
2. Toropov A.L. Classification of electric resistive heating boilers for autonomous water heating systems. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(10):1608-1616. DOI: 10.22227/19970935.2023.10.1608-1616 (rus.).
3. Bloess A., Schill W.P., Zerrahn A. Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials. *Applied Energy*. 2018; 212:1611-1626. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.073
4. Pieper C. *Transformation of the German energy system – Towards photovoltaic and wind power Technology Readiness Levels 2018 : PhD Dissertation*. Technische Universität Dresden, 2018; 264.
5. Hegazy A.A., Diab M.R. Performance of an improved design for storage-type domestic electrical water-heaters. *Applied Energy*. 2002; 71(4):287-306. DOI: 10.1016/S0306-2619(02)00006-5
6. Lee S., Jang D., Chung Y.S., Lee S. Cost-effective and highly efficient surface heating elements using high thermal conductive carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020; 137:105992. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105992
7. Pshenichnikov V. Commercial water heaters at enterprises. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2011; 6(114):40-43. EDN RHVZSV. (rus.).
8. Gorkin A.P. *Encyclopedia "Technology"*. Moscow, Rosmen, 2006; 488. (rus.).
9. Belavin Yu.A., Evstigneev M.A., Chernyavsky A.N. *Tubular electric heaters and installations and their application*. Moscow, Energoatomizdat, 1989; 157. (rus.).
10. Toropov A.L. Energy efficiency of an electric boiler with indirect surface resistive heating of the heat carrier. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(6):927-934. DOI: 10.22227/19970935.2023.6.927-934 (rus.).
11. Maruf N.I., Morales-Espana G., Sijm J., Helisto N., Kiviluoma J. Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems : a review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022; 53:102553. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102553
12. Muniak D.P. The impact of the use of anti-freeze substances on the heating installation thermohydraulic parameters and energy consumption. *Heat Transfer Engineering*. 2021; 42(3-4):347-353. DOI: 10.1080/01457632.2019.1699305
13. Serkani G., Poncet S. Ethylene- and propylene-glycol based nanofluids : a Literature review on their thermophysical properties and thermal performances. *Applied Sciences*. 2018; 8(11):2311. DOI: 10.3390/app8112311
14. Khavanov P.A., Barynin K.P. Features of the use of water-glycol heat carriers in autonomous heat supply systems. *AVOK*. 2003; 7. (rus.).
15. Khavanov P.A. Thermal engineering conditions for the use of water-glycol heat carriers in autonomous heat supply systems. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2003; 8. (rus.).
16. Goltyaev O.M. Application of antifreezes in heating, ventilation, air conditioning systems. *AVOK*. 2012; 6:46-55. EDN PBWOCR. (rus.).

17. Taileb A. A comparative study of a direct current heating system and a gas furnace heating coil. *WEENTECH Proceedings in Energy*. 2019; 185-194. DOI: 10.32438/WPE.3019
18. Hegazy A., Diab M.R. Performance of an improved design for storage-type domestic electrical water-heaters. *Applied Energy*. 2002; 71(4):287-306. DOI: 10.1016/S0306-2619(02)00006-5
19. Lee S., Jang D., Chung Y.S., Lee S. Cost-effective and highly efficient surface heating elements using high thermal conductive carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020; 137:105992. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105992
20. Boldrini A., Jiménez Navarro J.P., Crijns-Graus W.H.J., van den Broek M.A. The role of district heating systems to provide balancing services in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022; 154:111853. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111853
21. Pilipenko A.I. Industrial electrical heaters. *Industrial Electric Heating and Electric Heating*. 2012; 1:28-34. EDN YWDUPQ. (rus.).

Received April 3, 2025.

Adopted in revised form on May 12, 2025.

Approved for publication on May 12, 2025.

**B I O N O T E S:** **Alexey L. Toropov** — Candidate of Technical Sciences, General Director — Chief Designer; **Engineering Center “April”**; 13 Schelkovskoe shosse, Moscow, 105122, Russian Federation; ID RSCI: 1030472, Scopus: 58406665800, ORCID: 0000-0002-7457-6948; Toropov@aprilgroup.ru;

**Samvel V. Sargsyan** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Director of the Scientific and Educational Center “Heat and Gas Supply and Ventilation”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 429896, Scopus: 57204373040, ORCID: 0000-0003-3356-9116; sargsyansv@mgsu.ru.

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

*The authors declare no conflict of interest.*

# ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

## СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

**Имя Отчество 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 инициалы.

## АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

**Благодарности.** Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

**Ключевые слова** – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

## ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

**Основной текст научной статьи**, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом **IMRaD** и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

## РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

**Образец:**

**Рис. 1.** Пример рисунка в статье

**Figure 1.** Example of article image

**Табл. 1.** Пример таблицы в статье

**Table 1.** Example of table for article

## ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин ( $A$ ,  $F$ ,  $b$  и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ( $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников *на русском языке* оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников *на английском языке* (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

**Имя, Отчество, Фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

## СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

### **Образец:**

Вклад авторов:

**Фамилия И.О.** — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

**Фамилия И.О.** — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

**Фамилия И.О.** — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

**Фамилия И.О.** — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

# КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

## ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

## ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

**Введение** (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских 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:**

Список источников

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

**Образец:**

**Reference**

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

**Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:**

**Книги до трех авторов:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель\*, Год издания; Общее количество страниц.

**Образец:**

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

**Книги более трех авторов:** Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

**Статья в печатном журнале:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том\* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

**Образец:**

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

**Статья в электронном журнале:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том\* (Выпуск): Страницы. URL.

**Образец:**

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: [http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03\\_03\\_2017.pdf](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

## 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 источников сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в

статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

### Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

### Пример оформления:

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель тепломассопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

### REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

**Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Вклад авторов: Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

*Пример:*

*Артемяева С.С. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В.В. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.*

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

*Пример:*

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*Сведения об авторах* на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

**Bi o n o t e s:** **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

**Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

**Contribution of the authors:** Фамилия И.О. — описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д. / conceptualization, methodology, data gathering and processing, writing of the article, scientific editing of the text, supervision etc.) на английском языке.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

**ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.**



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 2025 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 2025 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/>

