

ISSN 1997-0935 (Print)
ISSN 2304-6600 (Online)
vestnikmgsu.ru

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 17 Выпуск 10/2022
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 17. Выпуск 10
2022**

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

Сквозной номер 167

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 17. Issue 10
2022**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 23-93
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	26.10.2022.
Подписан в свет	28.10.2022.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 15,13. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 323

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, почетный президент, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

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

Петр Банахук, 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, проф., д-р инж. (технические науки, строительные материалы), Технический университет Эйндховена, Королевство Нидерландов (Голландия)

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

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

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

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

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

Милан Голицки, д-р (технические науки, строительные конструкции), 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 Емноло, д-р техн. наук, проф., зав. каф. сопротивления материалов, теории упругости и пластичности,

Варшавский технологический университет, инженерно-строительный факультет, Республика Польша

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

Дмитрий Вячеславович Козлов, д-р техн. наук, проф., зав. каф. гидравлики и гидротехнического строительства, 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 техн. наук, проф., и.о. 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 техн. наук, проф., проф. каф. экономики и управления в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Левон Рафаэлович Маляян, 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., чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, зав. каф. информатики и прикладной математики, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: Анна Александровна Дядичева

Редактор: Татьяна Владимировна Бердникова

Корректор: Оксана Валерьевна Ермихина

Дизайн и верстка: Ольга Григорьевна Горюнова

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., доц., и.о. 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

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

Александр Николаевич Власов, д-р техн. наук, ВРИО директора, 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 обра-

зования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company “ASV Publishing House”, 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency “Informnauka”, magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	26.10.2022

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)”, 2022

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

Armen Z. Ter-Martirosyan, 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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova* **Layout:** *Ol'ga G. Goryunova*

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, Professor, Leading research scientist, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Mikhail Yu. Slesarev, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

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

С.С. Зимин, Р.А. Горшков, И.А. Войлоков, С.В. Корниенко

Причины образования трещин в штукатурке неотапливаемых каменных зданий 1297

Т.В. Иванцык, А.М. Салимов

Восточный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований 1307

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

М.Н. Кирсанов

Кинематический анализ и оценка частоты собственных колебаний плоской решетки 1324

О.В. Мкртычев, О.С. Щедрин, Е.М. Лохова

Определение коэффициентов надежности по ответственности для отдельных несущих элементов на основе вероятностного анализа 1331

Г.И. Белый

Расчет на устойчивость решетчатых элементов стальных конструкций 1347

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В.Т. Ерофеев, М.А. Ликомаскина, В.В. Афонин, А.И. Архипова

Стойкость асфальтобетонов в условиях воздействия биосреды 1358

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Н.В. Шунько, Н.Д. Зуев, Ф.В. Котов

Исследование волнового воздействия на сооружение соединительной дамбы морского угольного терминала 1372

К.Н. Анахаев

Расчет полных эллиптических интегралов третьего рода в прикладных исследованиях 1381

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

О.Д. Самарин

Совершенствование расчетных зависимостей для температуры воздуха в помещении при интегральном регулировании климатических систем 1389

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

И.В. Каракозова

Инжиниринг требований к формированию системы сметных документов в строительстве 1396

Требования к оформлению научной статьи 1408

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Sergey S. Zimin, Rostislav A. Gorshkov, Ilya A. Voilokov, Sergey V. Kornienko

Causes of cracks in the plaster of unheated stone buildings. 1297

Timur V. Ivantsyk, Alexey M. Salimov

The Eastern wing of the Musin-Pushkin estate in Moscow based on historical, architectural and field studies. . . 1307

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

Mikhail N. Kirsanov

Kinematic analysis and estimation of the frequency of natural oscillations of a planar lattice. 1324

Oleg V. Mkrtichev, Oleg S. Shchedrin, Ekaterina M. Lokhova

Determination of individual coefficients on the basis of probabilistic analysis. 1331

Grigory I. Belyi

To the calculation of the stability of lattice elements of steel structures 1347

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Vladimir T. Erofeev, Maya A. Likomaskina, Viktor V. Afonin, Anzhelika I. Arkhipova

A study on resistance of asphalt concrete exposed to the effect of mycelial fungi 1358

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Natalia V. Shunko, Nikolay D. Zuev, Philip V. Kotov

A study of the wave action on the structure of a connecting dam at the sea coal terminal 1372

Koshkinbai N. Anakhaev

To calculation of full elliptic integrals third sorts in applied researches 1381

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Oleg D. Samarin

Improvement of the calculated dependences for indoor air temperature in the integrated control of climate systems. 1389

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Irina V. Karakozova

Engineering requirements for the formation of a system of estimate documents in construction 1396

Requirements for research paper design 1408

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 17. Выпуск 10, 2022
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 17. Issue 10, 2022

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);
- 2.1.7. 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);
- 05.02.22. Организация производства (по отраслям) (технические науки);
- 05.23.07. Гидротехническое строительство (технические науки);
- 05.23.16. Гидравлика и инженерная гидрология (технические науки);
- 08.00.05. Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности) (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).

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

объявляет о возможности подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора наук на тему:
«Методология повышения организационно-технологической надежности строительной системы».

Конкурсный отбор состоится на заседании Научно-технического совета
НИУ МГСУ 15.11.2022 г. в 14.00.

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 692.232

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1297-1306

Причины образования трещин в штукатурке неотапливаемых каменных зданий

Сергей Сергеевич Зимин¹, Ростислав Александрович Горшков²,
Илья Анатольевич Войлоков³, Сергей Валерьевич Корниенко⁴

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);

г. Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП);

г. Санкт-Петербург, Россия;

³ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);

г. Санкт-Петербург, Россия;

⁴ Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Объект исследования — неотапливаемые каменные здания, в основном — исторические, в том числе объекты культурного наследия. Предметом исследования является анализ причин образования трещин во внутреннем штукатурном слое. Актуальность исследования обусловлена сильным влиянием повреждений внутреннего штукатурного покрытия на состояние настенной росписи и художественной отделки наружных стен законсервированных исторических объектов культурного наследия и отсутствием системных исследований причин появления изучаемых повреждений на стенах. Научная новизна работы состоит в разработке конечно-элементной модели, в которой фрагмент каменной кладки рассматривается совместно со штукатурным покрытием. Практическая значимость исследования заключается в установлении причинно-следственных связей между повреждениями несущих каменных стен и внутренних штукатурных покрытий. Исследование направлено на выявление наиболее значимых факторов и воздействий, оказывающих влияние на появление повреждений во внутреннем штукатурном слое неотапливаемых каменных зданий и культовых сооружений.

Материалы и методы. Для решения поставленных задач выполнен детальный анализ напряженного состояния штукатурного слоя при протекании в нем усадочных деформаций. Использованы численные методы исследований, в основу которых положена конечно-элементная модель фрагмента каменной кладки со штукатурным слоем.

Результаты. Построен график зависимости главных растягивающих напряжений от соотношения модуля упругости штукатурного раствора к модулю деформации каменной кладки. С увеличением данного соотношения значения главных растягивающих напряжений линейно возрастают. При достижении ими значения 1,0 МПа они становятся сопоставимыми с предельными напряжениями, при которых образуется трещина. Полученные результаты имеют важное практическое значение при разработке программ обследования, ремонта и восстановления исторических объектов культурного наследия.

Выводы. Установлено, что значения главных растягивающих напряжений практически не зависят от толщины штукатурного слоя. Влажностные деформации штукатурного слоя значительно превосходят температурные и являются наиболее значимыми факторами появления трещин на внутреннем штукатурном покрытии наружных стен при отсутствии силовых трещин в стенах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: неотапливаемые каменные здания, культовые сооружения, наружные стены, каменная кладка, внутренняя отделка, штукатурное покрытие, трещины

Благодарности. Авторы благодарят доктора технических наук, профессора Романа Болеславовича Орловича за идею написания данной статьи, ценные советы при планировании исследования и рекомендации по ее оформлению.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Зимин С.С., Горшков Р.А., Войлоков И.А., Корниенко С.В. Причины образования трещин в штукатурке неотапливаемых каменных зданий // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 10. С. 1297–1306. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1297-1306

Автор, ответственный за переписку: Ростислав Александрович Горшков, rostalsgor@gmail.com.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 17. Выпуск 10, 2022
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 17. Issue 10, 2022

Causes of cracks in the plaster of unheated stone buildings

Sergey S. Zimin¹, Rostislav A. Gorshkov², Ilya A. Voilokov³, Sergey V. Kornienko⁴

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); Saint-Petersburg, Russian Federation;

² Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI); Saint-Petersburg, Russian Federation;

³ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);

Saint-Petersburg, Russian Federation;

⁴ Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The objects of the study are unheated stone buildings. Most of them are historical, including cultural heritage sites. The subject of the study is the analysis of the causes of cracks in the inner plaster layer. Damage of the internal plaster coating has a strong influence on the condition of wall paintings and artistic decoration of the exterior walls of preserved historical objects of cultural heritage. There is a lack of systematic studies of the causes of the damage on the walls. The scientific novelty of the work is the development of a finite element model. In this model, a fragment of masonry is considered together with a plaster coating. The practical significance of the study is to establish causal relationships between damage to load-bearing stone walls and internal plaster coatings. The study is aimed at identifying the most significant factors and impacts that influence the appearance of damage in the inner plaster layer of unheated stone buildings and religious buildings.

Materials and methods. A detailed analysis of the stress state of the plaster layer during the course of shrinkage deformations in it was performed. Numerical research methods based on a finite element model of a fragment of masonry with a plaster layer were used.

Results. The paper provides a graph of the dependence of the main tensile stresses on the ratio of the modulus of elasticity of the plaster mortar to the modulus of deformation of the masonry. With an increase in this ratio, the values of the main tensile stresses increase linearly. When they reach a value of 1.0 MPa, they become comparable to the limiting stresses at which a crack is formed. The obtained results are of great practical importance in the development of programs for the inspection, repair and restoration of historical cultural heritage sites.

Conclusions. It is established that the values of the main tensile stresses practically do not depend on the thickness of the plaster layer. Humidity deformations of the plaster layer significantly exceed temperature ones and are the most significant factors for the appearance of cracks on the internal plaster coating of external walls in the absence of force cracks in the walls.

KEYWORDS: unheated stone buildings, religious buildings, exterior walls, masonry, interior decoration, plaster coating, cracks

Acknowledgements. The authors thank Doctor of Technical Sciences, Professor Roman B. Orlovich for the idea of writing this article, valuable advice when planning a study and recommendations for its design.

FOR CITATION: Zimin S.S., Gorshkov R.A., Voilokov I.A., Kornienko S.V. Causes of cracks in the plaster of unheated stone buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(10):1297-1306. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1297-1306 (rus.).

Corresponding author: Rostislav A. Gorshkov, rostalsgor@gmail.com.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство сохранившихся до настоящего времени исторических каменных зданий и культовых сооружений, как правило, оштукатурены не только с внешней, но и с внутренней стороны. За время длительной эксплуатации внешнее штукатурное покрытие постепенно утрачивает свои защитные свойства, подвергаясь при этом растрескиванию, отслоению и прочим деструктивным процессам. Внутренняя штукатурная отделка при этом находится в более благоприятных температурно-влажностных условиях эксплуатации, в связи с чем оказывается менее подверженной возникновению указанных выше повреждений. Исключением является ее растрескивание в результате образования силовых трещин, например, вызванных неравномерными осадками здания.

Факт образования подобных трещин обычно устанавливается путем вскрытия штукатурки, что не всегда оказывается возможным, например, при наличии на ней росписей и фресок. В практике так-

же встречаются трещины внутренней штукатурки, обусловленные температурно-влажностными деформациями, которые обычно появляются в неотапливаемых или законсервированных зданиях. Такие трещины, как правило, имеют нерегулярный характер и образуются в местах резкого изменения форм конструктивных элементов, наличия расположенных в толще штукатурки инородных включений, например скрытой электропроводки (рис. 1, а) либо неоднородности каменной кладки (рис. 1, б, с).

Следует отметить, что по сравнению с каменной кладкой отделочный штукатурный слой более чувствителен к температурно-влажностным воздействиям. Например, коэффициент температурного расширения штукатурки в зависимости от ее состава может оказаться в 1,5–2 раза больше, чем у каменной кладки, а деформации набухания и усадки в 10–15 раз больше. Кроме того, изменения температуры и влажности по толщине каменной кладки из-за инерционности тепломассопереноса происходят значительно

медленнее, чем в штукатурном слое. В связи с этим возникающие в штукатурке напряжения не успевают в полной мере отрелаксировать, достигая при этом предела прочности материала на растяжение и тем самым вызывая образование трещин.

Для оценки температурно-влажностных деформаций во всех слоях наружного ограждения требуется знание законов распределения в нем температуры и влажности. Явление тепломассопереноса в штукатурном слое имеет сложный характер и определяется многими факторами: тепловлажностным режимом помещений, физико-механическими характеристиками как самой штукатурки, так и ее основания (каменной кладки), параметрами наружного климата и др. Как показывает практика, ширина раскрытия усадочных трещин во внутреннем штукатурном покрытии в зависимости от его толщины может коле-

баться от нескольких долей до целых миллиметров. Причем с увеличением количества циклов увлажнения-высыхания штукатурного покрытия наблюдается тенденция к увеличению ширины раскрытия трещин. Для анализа этого процесса существенное значение имеет знание взаимосвязи влажностного состояния штукатурного слоя и температурно-влажностного режима (ТВР) внутри неотапливаемых зданий. Теоретические исследования этой взаимосвязи зависят от наличия большого массива исходных данных (годового хода суточных и месячных температур наружного воздуха, теплотехнических характеристик ограждающих конструкций, степени их массивности, кратности воздухообмена неотапливаемых помещений и др.). Более предпочтительными для анализа оказываются натурные исследования ТВР внутри неотапливаемых зданий.



Рис. 1. Трещины внутренней штукатурки из-за наличия в ней скрытой электропроводки (а); неоднородности каменной кладки простенка (b) и арочной перемычки (с)

Fig. 1. Cracks in the internal plaster due to the presence of hidden electrical wiring in it (a); heterogeneity of the masonry of the wall (b) and arched lintel (c)

Распределение температуры и влажности по толщине наружных ограждающих конструкций отапливаемых зданий изучено достаточно подробно [1–25]. Значительно меньше исследований посвящено вопросам влажностного режима наружных ограждений неотапливаемых зданий. Среди таких исследований следует выделить работы [26–32]. Однако в них рассмотрен ТВР помещений, в которых присутствуют источники тепlopоступлений, например трубопроводы системы отопления, проложенные в холодном чердаке. Более информативным в этом отношении является исследование [32], в котором приведены примеры годового хода температур и влажности внутреннего воздуха и его зависимость от наружных температур и влажности в неотапливаемых зданиях (рис. 2, 3).

Из анализа приведенных графиков следует, что зависимость температуры внутреннего воздуха от температуры внешнего воздуха является менее выраженной по сравнению с зависимостью изменения относительной влажности. Средние суточные колебания относительной влажности внутреннего воздуха могут достигать 15 %. В холодный период года относитель-

ная влажность изменяется в достаточно широком диапазоне: в морозную погоду она снижается до 60–75 %, в период кратковременных потеплений — повышается до 98–100 %, поэтому внутри памятника постоянно создаются условия для выпадения конденсата (иней). В сочетании с промерзанием ограждающих конструкций это явление отрицательно сказывается на состоянии настенной живописи [32].

Кроме того, характер изменения относительной влажности воздуха в здании по его высоте непосредственно зависит от распределения по высоте температуры внутреннего воздуха. В связи с этим изменения влажностных деформаций штукатурного слоя по сравнению с температурными оказываются более выраженными.

При этом существенны деформации усадки, вызывающие растягивающие напряжения в штукатурном слое. Как известно, усадка возникает и увеличивается, когда из материала удаляется вода, находящаяся в гидратных оболочках частиц и мелких порах. Испарение воды из крупных пор не ведет к сближению частиц материала и практически не вызывает объемных изменений [33]. Необходимо от-

метить, что относительные усадочные деформации штукатурного слоя, связанные с его высыханием, значительно превосходят относительные температурные деформации. При этом известковые растворы легко поглощают избыточную влагу из воздуха и лег-

ко ее отдают при снижении относительной влажности в помещении. Из сказанного следует, что основной причиной образования трещин во внутреннем штукатурном слое является сезонное изменение его влажности.

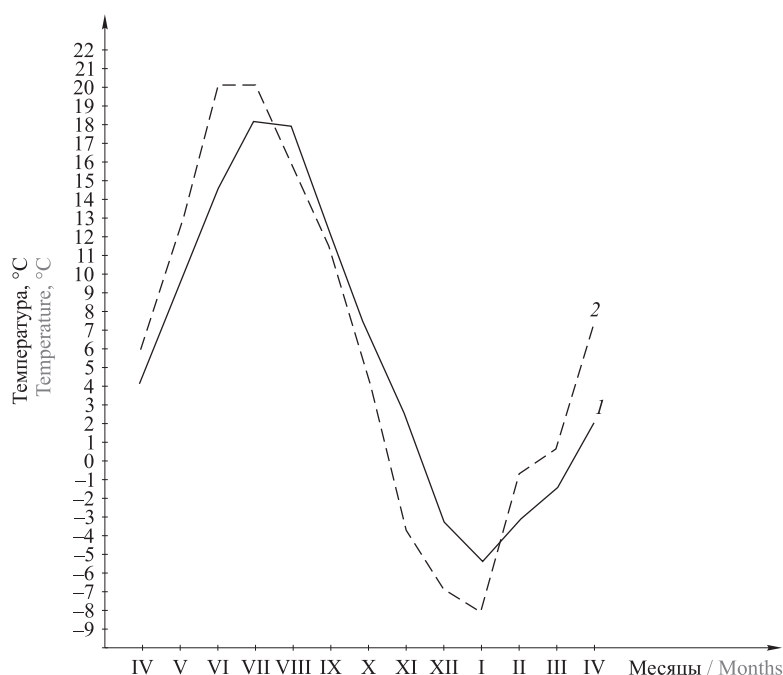


Рис. 2. Годовой ход температуры наружного (2) и внутреннего (1) воздуха в Дмитриевском соборе г. Владимира (по среднемесячным значениям) [32]

Fig. 2. The annual course of the external (2) and internal (1) temperature in the Dmitrievsky Cathedral of Vladimir (according to monthly averages) [32]

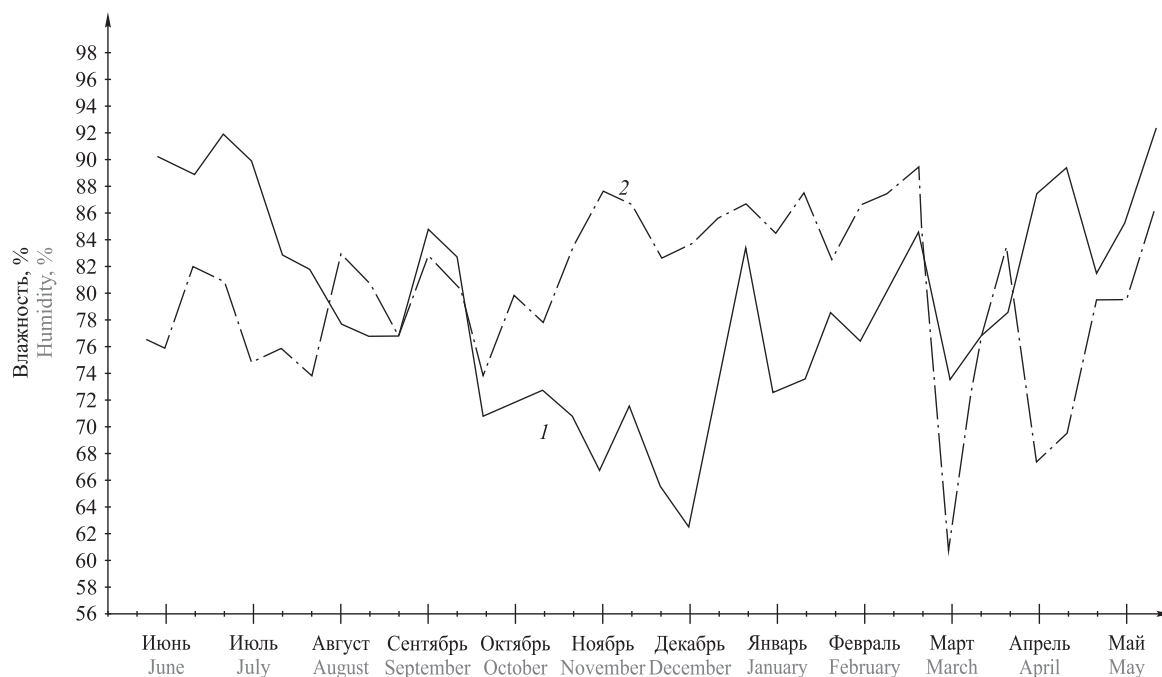


Рис. 3. Годовой ход относительной влажности наружного (2) и внутреннего (1) воздуха в соборе Рождества Богородицы в Суздале (по среднедекадным значениям) [32]

Fig. 3. The annual course of the relative humidity of the external (2) and internal (1) air in the Cathedral of the Nativity of the Virgin in Suzdal (by average values) [32]

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью более детального анализа напряженно-состояния штукатурного слоя при протекании усадочных деформаций авторами выполнены численные исследования, в основу которых положена конечно-элементная модель фрагмента каменной кладки со штукатурным слоем (рис. 4). Толщина кладки принята равной 510 мм, толщина штукатурного слоя варьировалась в пределах 10–50 мм. Коэффициент усадки штукатурки принят равным 0,1 мм/м. При этом усадочное воздействие задавалось температурой по известной зависимости $T(sh)_{\text{экв}} = \xi(sh)/\alpha t$. В расчетах принято равномерное развитие усадки по толщине штукатурного слоя.

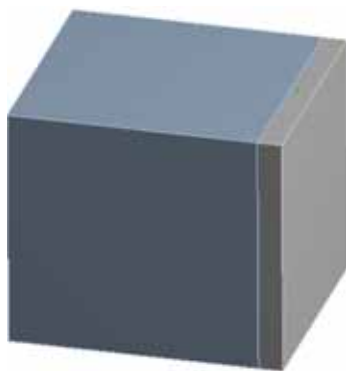


Рис. 4. Расчетная модель фрагмента кладки со штукатурным слоем

Fig. 4. Calculation model of a masonry fragment with a plaster layer

Поскольку трещиностойкость штукатурного слоя связана с его адгезией к кирпичному основанию, то в расчетной модели учитывалось их полное сцепление. Модуль деформации кладки определен в соответствии с СП 15.13330 как для кирпича марки М75, так и раствора М25: $E_k = 1000$ МПа. Варьируемым параметром являлось соотношение модуля упругости штукатурного раствора E_p к модулю деформации каменной кладки E_k (E_p/E_k). Результаты получены при соотношении $E_p/E_k = 0,5–5$. Верхняя граница $E_k = 5000$ МПа соответствует жесткому раствору, модуль упругости которого определен в соответствии с СП 63.13330 как для мелкозернистого бетона естественного твердения. Нижняя граница соответствует пластичным известковым растворам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате расчетов установлено, что значения главных растягивающих напряжений σ_1 практически не зависят от толщины штукатурного слоя, хотя и несколько увеличиваются с его утолщением. Напряжения σ_1 по толщине штукатурного слоя распределены практически равномерно, с увеличением напряжений к наружным слоям (данный эффект усиливается при утолщении штукатурного слоя). Значения главных растягивающих напряжений σ_1 линейно возрастают с увеличением соотношения E_p/E_k (рис. 5). Из рисунка видно, что для жестких растворов значение σ_1 может достигать 1,0 МПа, что соизмеримо с предельными напряжениями, при которых образуется трещина.

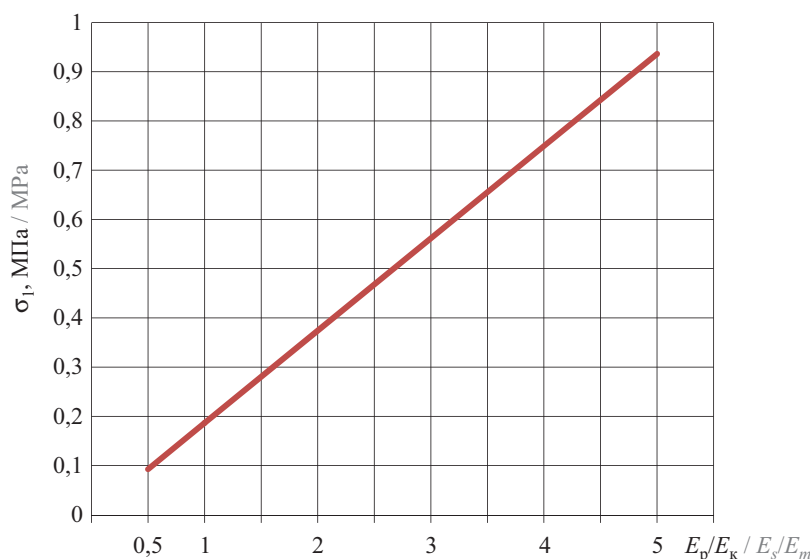


Рис. 5. График зависимости главных растягивающих напряжений σ_1 от соотношения E_p/E_k

Fig. 5. Graph of the dependence of the main tensile stresses σ_1 on the E_p/E_k ratio

Дополнительно выполнен численный анализ влияния неоднородных включений на напряженное состояние штукатурки при ее усадке и набухании. Таким включением, в частности, может оказаться

электропроводка, которая из эстетических соображений часто скрывается в штукатурном слое (рис. 1, а). Установлено, что при протекании усадочных деформаций (рис. 6, а) главные растягивающие напряже-

ния σ_1 непосредственно в зоне концентрации (вокруг провода) в 1,5 раза превышают средние растягивающие напряжения в штукатурном слое. При протекании деформаций набухания (рис. 6, б) в штукатурном

слое действуют сжимающие напряжения. Однако непосредственно в зоне концентрации (вокруг провода) возникают растягивающие напряжения σ_1 , значения которых достигают 0,3 МПа.



Рис. 6. Изополя главных растягивающих напряжений σ_1 , МПа, в штукатурном слое с электропроводкой при протекании деформаций усадки (а) и набухания (б)

Fig. 6. Isofields of the main tensile stresses σ_1 , MPa, in a plaster layer with electrical wiring during the course of shrinkage deformations (а) and swelling (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнен анализ причин образования трещин во внутреннем штукатурном слое неотапливаемых каменных зданий. Установлено, что значения главных растягивающих напряжений практически не зависят от толщины штукатурного слоя. В результате исследований построен график зависимости главных растягивающих напряжений от соотношения модуля упругости штукатурного раствора к модулю деформации каменной кладки. С увеличением данного соотношения значения главных растягивающих напряжений линейно возрастают. При достижении ими значения 1,0 МПа они становятся сопоставимыми

с предельными напряжениями, при которых образуется трещина.

Влажностные деформации штукатурного слоя превосходят температурные и являются наиболее значимыми факторами появления трещин на внутреннем штукатурном покрытии наружных стен при отсутствии силовых трещин в стенах. Неоднородные включения в штукатурном слое также оказывают влияние на развитие повреждений при изменяющихся параметрах микроклимата в неотапливаемых зданиях и культовых сооружениях.

Полученные результаты имеют важное практическое значение при разработке программ обследования, ремонта и восстановления исторических объектов культурного наследия.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Петриченко М.Р., Горшков А.С. Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 6 (33). С. 19–33. DOI: 10.18720/CUBS.33.2
2. Ватин Н.И., Горшков А.С., Глумов А.В. Влияние физико-технических и геометрических характеристик штукатурных покрытий на влажностный режим однородных стен из газобетонных блоков // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 1 (19). С. 28–33. DOI: 10.18720/MCE.19.7
3. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Горшков А.С. Оценка влажностного режима стен с фасадными теплоизоляционными композиционными системами // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 6 (45). С. 34–54. DOI: 10.18720/CUBS.45.2
4. Немова Д.В., Ватин Н.И., Петриченко М.Р., Корниенко С.В., Горшков А.С. Воздушный режим трехслойной стеновой конструкции // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 6 (45). С. 102–114. DOI: 10.18720/CUBS.45.6
5. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Горшков А.С., Ольшевский В.Я., Пестряков И.И. Эксплуатационная влажность автоклавного газобетона в стеновых конструкциях // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 8 (71). С. 22–40. DOI: 10.18720/CUBS.71.3
6. Vatin N., Gorshkov A., Nemova D., Gamayunova O., Tarasova D. Humidity conditions of homogeneous wall from gas-concrete blocks with finishing plaster compounds // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 670–671. Pp. 349–354. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.349.
7. Vatin N.I., Gorshkov A.S., Nemova D.V., Staritsyna A.A., Tarasova D.S. The energy-efficient heat

insulation thickness for systems of hinged ventilated facades // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 941–944. Pp. 905–920. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.905

8. *Gorshkov A., Vatin N., Nemova D., Shabaldin A., Melnikova L., Paramonov K.* Using life-cycle analysis to assess energy savings delivered by building insulation // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 117. Pp. 1080–1089. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.240

9. *Zadvinskaya T.O., Gorshkov A.S.* Comprehensive method of energy efficiency of residential house // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 953–954. Pp. 1570–1577. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.953-954.1570

10. *Perlova E., Platonova M., Gorshkov A., Rakova X.* Concept project of zero energy building // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 100. Pp. 1505–1514. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.522

11. *Vatin N., Gorshkov A., Nemova D., Tarasova D.* Energy efficiency of facades at major repairs of buildings // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 633–634. Pp. 991–996. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.991

12. *Vatin N., Gorshkov A., Rymkevich P., Nemova D., Tarasova D.* Nonstationary thermal conduction through the building envelope // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 670–671. Pp. 365–369. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.365

13. *Gorshkov A., Demidov A., Makarov A.* Development of methods for calculating non-stationary heat transfer between multilayer structures // *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. 2020. Pp. 124–135. DOI: 10.1201/9781003164395-18

14. *Shakhova E.A., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S., Egorov M.Yu., Stepashkina A.S.* Energy processes with natural quantization // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 124. P. 01046. DOI: 10.1051/e3sconf/201912401046

15. *Gorshkov A., Murgul V.A., Oliyunk O.* Forecasted payback period in the case of energy-efficient activities // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 53. P. 01045. DOI: 10.1051/mateconf/20165301045

16. *Vatin N., Gorshkov A., Nemova D., Gamayunova O., Tarasova D.* Humidity conditions of homogeneous wall from gas-concrete blocks with finishing plaster compounds // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 670–671. Pp. 349–354. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.349

17. *Gorshkov A., Murgul V.* Calculation of heat energy consumption by a typical historical building with a courtyard // *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017*. 2018. Pp. 577–591. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_61

18. *Gorshkov A., Ivanova E.* Reduced thermal resistance of a two-layer wall construction // *Applied*

Mechanics and Materials. 2015. Vol. 725–726. Pp. 49–56. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.725-726.49

19. *Kostenko V., Gafiyatullina N., Zulkarneev G., Gorshkov A., Petrichenko M., Movafagh S.* Solutions to improve the thermal protection of the administrative building // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 73. P. 02011. DOI: 10.1051/mateconf/20167302011

20. *Vatin N., Korniyenko S.V., Gorshkov A.S., Pestryakov I.I., Olshevskiy V.* Actual thermophysical characteristics of autoclaved aerated concrete // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. No. 4 (96). Pp. 129–137. DOI: 10.18720/MCE.96.11

21. *Vatin N., Gorshkov A., Kazimirova A., Gureev K., Nemova D.* Calculation of payback period mineral wool with longitudinal fibers of ite Pariso (Parexlanko) // *Journal of Applied Engineering Science*. 2014. Vol. 12. No. 3. Pp. 207–216. DOI: 10.5937/jaes12-6552.

22. *Vasileva I.L., Nemova D.V., Vatin N.I., Fediuk R.S., Karelina M.I.* Climate-adaptive façades with an air chamber // *Buildings*. 2022. Vol. 12. Issue 3. P. 366. DOI: 10.3390/buildings12030366

23. *Nowak R., Orłowicz R., Rutkowski R.* Use of TLS (lidar) for building diagnostics with the example of a historic building in Karlino // *Buildings*. 2020. Vol. 10. Issue. 2. P. 24. DOI: 10.3390/buildings10020024.

24. *Korniyenko S.V., Astafurova T.N., Kozlova O.P.* Energy efficient major overhaul in residential buildings of the first mass series // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. Issue 4. P. 042039. DOI: 10.1088/1757-899X/753/4/042039

25. *Горшков А.С., Ватин Н.И., Дацюк Т.А., Безруков А.Ю., Немова Д.В., Какула П. и др.* Альбом технических решений по применению теплоизоляционных изделий из пенополиуретана в строительстве жилых, общественных и промышленных зданий // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. № 5 (20). С. 71–441. DOI: 10.18720/CUBS.20.7

26. *Горшков А.С., Ватин Н.И., Урустимов А.И., Рымкевич П.П.* Расчетный метод обоснования технологических мероприятий по предотвращению образования ледяных дамб на крышах зданий со скатной кровлей // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 3 (29). С. 69–73. DOI: 10.5862/MCE.29.9

27. *Горшков П.А., Войлоков И.А.* Условия образования наледей на скатных крышах зданий с холодным чердаком // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. № 1. С. 60–71. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.60-71

28. *Vatin N., Gorshkov A., Nemova D., Urustimov A., Staritsyna A., Rymkevich P.* Calculation method of justification of technical actions for prevention of ice dams formation on buildings with a pitched roof // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 725–726. Pp. 9–14. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.9

29. Vatin N., Gorshkov A., Dadchenko A., Rymkevich P., Olshevskiy V. The method and computation of air change required for attic rooms // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017. № 2 (53). Pp. 50–60. DOI: 10.18720/CUBS.53.4

30. Горшков А.С., Дадченко А.Ю., Ольшевский В.Я., Рымкевич П.П. Оценка воздухообмена, требуемого для нормализации температурно-влажностного режима холодных чердаков // *Кровельные и изоляционные материалы*. 2016. № 4. С. 33–36.

31. Дорохов В.Б., Шилкин Н.В., Пинтелин Н.Ю. Методы исследования теплофизических особенностей ограждающих конструкций памятников архитектуры // *АВОК*. 2018. № 1. С. 30–39.

32. Девина Р.А., Илларионова И.В., Ребрикова Н.Л. и др. Микроклимат церковных зданий. М. : ГосНИИР, 2000. С. 38–59.

33. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М. : Мир, 1984. 306 с.

Поступила в редакцию 18 июля 2022 г.

Принята в доработанном виде 12 октября 2022 г.

Одобрена для публикации 12 октября 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Сергеевич Зимин** — кандидат технических наук, доцент, Инженерно-строительный институт; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 641651; zimin_sergei@mail.ru;

Ростислав Александрович Горшков — студент; **Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)**; 190005, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67; РИНЦ ID: 1033779; rostalsgor@gmail.com;

Илья Анатольевич Войлоков — кандидат технических наук, доцент; **Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; РИНЦ ID: 546991; i.voilokov@outlook.com;

Сергей Валерьевич Корниенко — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой архитектуры зданий и сооружений, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. Ленина, д. 28; РИНЦ ID: 351367; svkorn2009@yandex.ru.

Вклад авторов:

Зимин С.С. — сбор материала, составление расчетной модели, численное моделирование.

Горшков Р.А. — сбор и обработка исходных данных, написание исходного текста, составление расчетной модели.

Войлоков И.А. — концепция исследования, развитие методологии.

Корниенко С.В. — научное редактирование текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kornienko S.V., Vatin N.I., Petrichenko M.R., Gorshkov A.S. Evaluation of hygrothermal performance of multilayered wall design in annual cycle. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015; 6(33):19-33. DOI: 10.18720/CUBS.33.2 (rus.).

2. Vatin N.I., Gorshkov A.S., Glumov A.V. Influence of the physico-technical and geometrical characteristics of plastering covering on moisture conditions of AAC-blocks homogeneous walls. *Magazine of Civil Engineering*. 2011; 1(19):28-33. DOI: 10.18720/MCE.19.7 (rus.).

3. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Assessment of moisture conditions of walls with facade's thermo-insulation composite. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016; 6(45):34-54. DOI: 10.18720/CUBS.45.2 (rus.).

4. Nemova D.V., Vatin N.I., Petrichenko M.R., Korniyenko S.V., Gorshkov A.S. Air mode of a tripple wall. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016; 6(45):102-114. DOI: 10.18720/CUBS.45.6 (rus.).

5. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S., Olshevskiy V.Ya., Pestryakov I.I. Operational humidity of autoclaved aerated concrete in outer walls. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2018; 71(8):22-40. DOI: 10.18720/CUBS.71.3 (rus.).

6. Vatin N., Gorshkov A., Nemova D., Gamayunova O., Tarasova D. Humidity conditions of homogeneous wall from gas-concrete blocks with finishing plaster compounds. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 670-671:349-354. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.349

7. Vatin N.I., Gorshkov A.S., Nemova D.V., Staritsyna A.A., Tarasova D.S. The energy-efficient heat insulation thickness for systems of hinged ventilated facades. *Advanced Materials Research*. 2014; 941-944:905-920. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.905
8. Gorshkov A., Vatin N., Nemova D., Shalbaldin A., Melnikova L., Paramonov K. Using life-cycle analysis to assess energy savings delivered by building insulation. *Procedia Engineering*. 2015; 117:1080-1089. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.240
9. Zadvinskaya T.O., Gorshkov A.S. Comprehensive method of energy efficiency of residential house. *Advanced Materials Research*. 2014; 953-954:1570-1577. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.953-954.1570
10. Perlova E., Platonova M., Gorshkov A., Rakova X. Concept project of zero energy building. *Procedia Engineering*. 2015; 100:1505-1514. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.522.
11. Vatin N., Gorshkov A., Nemova D., Tarasova D. Energy efficiency of facades at major repairs of buildings. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 633-634:991-996. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.991.
12. Vatin N., Gorshkov A., Rymkevich P., Nemova D., Tarasova D. Nonstationary thermal conduction through the building envelope. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 670-671:365-369. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.365.
13. Gorshkov A., Demidov A., Makarov A. Development of methods for calculating non-stationary heat transfer between multilayer structures. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. 2020; 124-135. DOI: 10.1201/9781003164395-18
14. Shakhova E.A., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S., Egorov M.Yu., Stepashkina A.S. Energy processes with natural quantization. *E3S Web of Conferences*. 2019; 124:01046. DOI: 10.1051/e3sconf/201912401046
15. Gorshkov A., Murgul V.A., Oliynyk O. Forecasted payback period in the case of energy-efficient activities. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 53:01045. DOI: 10.1051/matecconf/20165301045
16. Vatin N., Gorshkov A., Nemova D., Gama-yunova O., Tarasova D. Humidity conditions of homogeneous wall from gas-concrete blocks with finishing plaster compounds. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 670-671:349-354. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.349
17. Gorshkov A., Murgul V. Calculation of heat energy consumption by a typical historical building with a courtyard. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017*. 2018; 577-591. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_61
18. Gorshkov A., Ivanova E. Reduced thermal resistance of a two-layer wall construction. *Applied Mechanics and Materials*. 2015; 725-726:49-56. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.725-726.49
19. Kostenko V., Gafiyatullina N., Zulkarneev G., Gorshkov A., Petrichenko M., Movafagh S. Solutions to improve the thermal protection of the administrative building. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 73:02011. DOI: 10.1051/matecconf/20167302011
20. Vatin N., Korniyenko S.V., Gorshkov A.S., Pestryakov I.I., Olshevskiy V. Actual thermophysical characteristics of autoclaved aerated concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 4(96):129-137. DOI: 10.18720/MCE.96.11
21. Vatin N., Gorshkov A., Kazimirova A., Gureev K., Nemova D. Calculation of payback period mineral wool with longitudinal fibers of ite Pariso (Parexlanko). *Journal of Applied Engineering Science*. 2014; 12(3):207-216. DOI: 10.5937/jaes12-6552
22. Vasileva I.L., Nemova D.V., Vatin N.I., Fedjuk R.S., Karelina M.I. Climate-adaptive facades with an air chamber. *Buildings*. 2022; 12:3:366. DOI: 10.3390/buildings12030366
23. Nowak R., Orłowicz R., Rutkowski R. Use of TLS (lidar) for building diagnostics with the example of a historic building in Karlino. *Buildings*. 2020; 10(2):24. DOI: 10.3390/buildings10020024
24. Korniyenko S.V., Astafurova T.N., Kozlova O.P. Energy efficient major overhaul in residential buildings of the first mass series. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753(4):042039. DOI: 10.1088/1757-899X/753/4/042039
25. Gorshkov A.S., Vatin N.I., Datsuk T.A., Bezrukov A.Yu., Nemova D.V., Käkälä P. et al. Album of technical solutions for the application of polyurethane foam thermal insulation products in construction of residential, public and industrial buildings. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014; 5(20):71-441. DOI: 10.18720/CUBS.20.7 (rus.).
26. Gorshkov A.S., Vatin N.I., Urustimov A.I., Rymkevich P.P. Computational justification for engineering measures preventing the ice dams formation on the pitched roofs. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 3(29):69-73. DOI: 10.5862/MCE.29.9 (rus.).
27. Gorshkov R.A., Voilokov I.A. Conditions for the formation of ice dams on pitched roofs of buildings with cold attics. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(1):60-71. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.60-71 (rus.).
28. Vatin N., Gorshkov A., Nemova D., Urustimov A., Staritsyna A., Rymkevich P. Calculation method of justification of technical actions for prevention of ice dams formation on buildings with a pitched roof. *Applied Mechanics and Materials*. 2015; 725-726:9-14. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.9
29. Vatin N., Gorshkov A., Dadchenko A., Rymkevich P., Olshevskiy V. The method and computation of air change required for attic rooms. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017; 2(53):50-60. DOI: 10.18720/CUBS.53.4
30. Gorshkov A.S., Dadchenko A.Yu., Olshevskiy V.Ya., Rymkevich P.P. Assessment of air required for

normalization of temperature and humidity conditions of the cold attics. *Roofing and Insulation Materials*. 2016; 4:33-36. (rus.).

31. Doroxov V.B., Shilkin N.V., Pintelin N.Yu. Methods of investigation of thermophysical features of enclosing structures of architectural monuments. *ABOK*. 2018; 1:30-39. (rus.).

32. Devina R.A., Illarionova I.V., Rebrikova N.L. et al. *Microclimate of church buildings. Fundamentals of normalization of temperature and humidity regime of monuments of religious architecture*. Moscow, GosNIIR, 2000; 38-59. (rus.).

33. Greg S., Sing K. *Adsorption, specific surface area, porosity*. Moscow, Mir, 1984; 306. (rus.).

Received July 18, 2022.

Adopted in revised form on October 12, 2022.

Approved for publication on October 12, 2022.

B I O N O T E S : **Sergey S. Zimin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Civil Engineering; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya st., Saint-Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 641651; zimin_sergei@mail.ru;

Rostislav A. Gorshkov — Student; **Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI)**; 67 Bolshaya Morskaya st., Saint-Petersburg, 190000, Russian Federation; ID RISC: 1033779; rostalsgor@gmail.com;

Ilya A. Voilokov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 Vtoraya Krasnoarmeiskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RISC: 546991; i.voilokov@outlook.com;

Sergey V. Kornienko — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of the Architecture of Buildings and Structures, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation; ID RISC: 546991; svkorn2009@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Sergey S. Zimin — collection of material, compilation of a computational model, numerical studies.

Rostislav A. Gorshkov — data gathering and processing, scientific guidance, compilation of the calculation model.

Ilya A. Voilokov — conceptualization, methodology.

Sergey V. Kornienko — scientific editing of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 72:351.853

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1307-1323

Восточный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований

Тимур Викторович Иванцык, Алексей Маратович Салимов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен один из объектов культурного наследия, участвующий в формировании архитектурного облика усадьбы Мусиных-Пушкиных на пересечении Доброслободской и Спартаковской улиц в Москве (ныне комплекс зданий Московского государственного строительного университета), — восточный флигель ансамбля, оформляющего границу домовладения с востока. Не имея статуса объекта культурного наследия, это сооружение к настоящему времени претерпело многочисленные преобразования, что отразилось как на фасадах, так и в интерьерах постройки. Основная цель данной работы — проследить историю формирования флигеля, исследуя его объем в структуре окружающих строений, определить строительную периодизацию постройки, выявить первоначальный облик этого здания и, как следствие, — предложить графическую реконструкцию данного сооружения, которая будет учитывать не только наиболее ранний период его существования, но и тот этап, который обогатил здание новыми, не менее интересными архитектурными формами.

Материалы и методы. Изучение постройки основано на методе комплексного источниковедения, включающего поиск и анализ источников и литературы, натурные исследования, сопровождавшиеся устройством зондажей, закладкой шурфов и обмерными работами, химико-технологическое изучение строительных и отделочных материалов. Используя сравнительный метод, данный объект рассмотрен в кругу стилистически и типологически близких построек.

Результаты. В результате проведенных исследований в структуре корпуса выявлен ряд признаков, свидетельствующих о наличии исторического ядра, сформировавшего объем исследуемого здания. Установлена строительная периодизация постройки, датированы ее существующие объемы, обнаружены и изучены первоначальные элементы строения и выделены более поздние напластования. Все это позволило установить облик постройки в различные периоды ее существования и разработать графическую реконструкцию здания.

Выводы. Предложенная реконструкция памятника — это результат комплексных исследований, которые дают возможность воссоздать первоначальный облик здания с учетом его утраченных объемов. Это позволит обогатить и сделать более целостным один из интереснейших усадебных ансамблей Москвы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: усадебный комплекс на Разгуляе, усадьба Мусиных-Пушкиных в Москве, восточный флигель, М.Ф. Казаков, классицизм, Спартаковская улица

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: 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. Вып. 10. С. 1307–1323. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1307-1323

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

The Eastern wing of the Musin-Pushkin estate in Moscow based on historical, architectural and field studies

Timur V. Ivantsyk, Alexey M. Salimov

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

ABSTRACT

Introduction. The paper concentrates on a cultural heritage object that is involved in forming the architectural look of the Musin-Pushkin Estate at the intersection of Dobroslobodskaya and Spartakovskaya Streets in Moscow (now the group of buildings of the Moscow State University of Civil Engineering) — the eastern wing of the ensemble, that forms the eastern corner of the estate. This building hasn't a status of cultural heritage object and has undergone numerous renovations and reorganisations by present time, and we can see the signs of it in the interiors and on the facades of the monument. The main aim of this work — to retrace the wing's forming during the history by consideration its volume in the context of the surrounding buildings, to uncover the initial look of the monument, and to define its construction periodization, and, as a consequence, — to propose graphical reconstruction of this structure, which will consider not only the earliest period of the structure's being, but the stage of the enrichment by new, however no less interesting architectural forms.

Materials and methods. The study of the monument was based on the method of comprehensive source study, which includes the search and analysis of sources and literature, field studies, including probing, pit sampling and measuring work, as well as chemical development study of building and finishing materials. Using the comparative method, this object was studied among stylistically and typologically similar buildings.

Results. As a result of the studies, an amount of the signs show on the availability of the historical core, which has formed the volume of the wing. The construction periodization of the monument was identified, its existing volumes were dated, the initial elements of the building were revealed and studied, and later strata were identified, which allowed to identify a look of the structure in different periods of it's being and developing a graphic reconstruction of the eastern wing at the initial period.

Conclusions. The proposed reconstruction of the monument has resulted from the comprehensive studies allowing to reconstruct the initial look of the building with taking into account its lost volumes. As a result, it will enrich one of the most fascinating manor ensembles in Moscow providing its completion.

KEYWORDS: manor complex on Razgulay, homestead Musin-Pushkin in Moscow, eastern wing, M.F. Kazakov, classicism, Spartakovskaya street

FOR CITATION: 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.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Комплекс зданий Московского государственного строительного университета — один из архитектурных ансамблей Москвы эпохи классицизма, созданный в начале XIX в. стараниями известного вельможи екатерининского времени, коллекционера и ученого Алексея Ивановича Мусина-Пушкина. Согласно сложившейся историографической традиции автором этого комплекса мог быть М.Ф. Казаков или зодчий, «близкий его кругу» [1]. За время своего существования ансамбль на Разгуляе претерпел немало изменений, что способствовало внедрению в структуру классицистической усадьбы ряда дисгармонирующих объемов и утрате отдельных элементов комплекса. Такая ситуация сложилась в отношении ограды по улице Спартаковской, чей исторический облик был в значительной степени утрачен [2], северного флигеля, который также сохранился не полностью [3]. Подобная участь постигла и здание, расположенное в восточной части участка и не имеющее статуса объекта культурного наследия. Это строение условно можно назвать «восточным флигелем»¹.

Рассматриваемая постройка расположена к юго-востоку от главного дома усадьбы, фиксируя восточную границу домовладения в ее южной части. Представляет собой вытянутое по оси север-юг двухэтажное строение, сложное в плане формы, что обусловлено многочисленными, в основном одноэтажными, пристройками. Главным фасадом двух-

этажного, перекрытого вальмовой с одним фронтоном кровлей здания является западный (рис. 1). Это тринадцатисековая плоскость, пробитая широкими световыми проемами в уровне первого и второго этажей и завершенная едва выступающим невыразительным карнизом. Композиция фасада, не имея условного центра, с правой (южной) стороны акцентирована узким в два этажа витражным окном, понижающим фасад здания от цоколя до венчающего карниза. Рядом (к северу) в уровне второго этажа устроен небольшой круглый оконный проем. Эта фасадная плоскость «пробита» двумя дверными проемами — с правой и с левой стороны постройки.

Восточный фасад здания, некогда обращенный в сторону парка, это сочетание разновременных строений, одно из которых подкрепляет данную плоскость сооружения (рис. 2). Первый этаж здания с этой стороны выполнен в виде глухой стены, не имеет ни оконных, ни дверных проемов и лишен декоративного убранства. Лицевая плоскость второго этажа оформлена широкими оконными проемами, аналогично противоположному западному фасаду здания.

Северный (торцевой) фасад состоит из небольших разновременных пристроек, которые, порой, существенно отличаются своими технико-технологическими данными. Эта стена не имеет декоративного убранства. Она пробита лишь прямоугольными оконными проемами, три из которых расположены в первом и два во втором ярусах флигеля. В уровне второго этажа присутствует переход, ведущий в соседнее здание 1930-х гг. постройки.

Предельно скромный южный торцевой фасад здания. Он представляет собой ровную плоскость стены, завершенную деревянным фронтоном. Справа к дому примыкает небольшая одноэтажная пристройка.

¹ Продольная и поперечная оси здания не соответствуют сторонам света, но для удобства изложения было принято решение отказаться от двухсоставного наименования фасадов. К примеру, вместо северо-западного в тексте говорится о северном фасаде и т.д.



Рис. 1. Москва. Восточный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице. Вид главного (западного) фасада. Существующее состояние. Фото 2019 г.

Fig. 1. Moscow. The eastern wing of the Musin-Pushkin estate on the Spartakovskaya str. View of the main (western) facade. Existing state. Photo of 2019



Рис. 2. Москва. Восточный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице. Вид восточного фасада. Существующее состояние. Фото 2021 г.

Fig. 2. Moscow. The eastern wing of the Musin-Pushkin estate on the Spartakovskaya str. View of the eastern facade. Existing state. Photo of 2021

Интерьеры здания выполнены согласно преобразованиям советского периода с применением железобетонных перекрытий и современных отделочных материалов. Свидетельством более ранних строительных периодов в структуре интерьера служат лишь массивные кирпичные стены с клинчатыми перемычками оконных проемов и небольшой фрагмент сводчатой конструкции «Монье».

В целом существующее положение фиксирует богатую строительную историю, когда в угоду утилитарных нужд на различных этапах сооружение обрастало разнообразными по облику и объему пристройками.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование данной постройки проведено с использованием комплекса методов, направленных на изучение объекта, его истории, этапов формирования и строительной периодизации. Особое внимание было уделено архитектурно-археологическому направлению, анализу выявленных объемов, фиксации их параметров и моделированию объемно-пространственной композиции постройки. Материалами для исследования стали выявленные в ходе натурных изысканий подлинные фрагменты стен с оконными и дверными проемами, а также первоначальные арочные проемы, что позволило представить исторический облик постройки и легло в основу концептуального решения и графической реконструкции исследуемого здания.

В рамках комплексного подхода проведены исследования в следующих направлениях:

- 1) осуществлен поиск и выполнен анализ источников и литературы относительно исследуемого объема и ансамбля усадьбы в целом;
- 2) выполнены натурные исследования, сопровождавшиеся устройством зондажей, закладкой шурфов, обмерными работами и химико-технологическим изучением строительных и отделочных материалов;
- 3) с использованием сравнительно-исторического метода изучены стилистически и типологически близкие аналоги восточному флигелю усадьбы Мусиных-Пушкиных;
- 4) подготовлена графическая реконструкция постройки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Служебное здание на месте ныне существующего восточного флигеля появилось как минимум в XVIII столетии, но вплоть до конца XVIII в. здесь находилась деревянная постройка [4]. По всей вероятности, ситуация изменилась в первое десятилетие XIX в., поскольку в сентябре 1813 г., когда Мусины-Пушкины возобновляли усадебные постройки после грандиозного пожара, уничтожившего значительную часть Москвы, помимо «главного трехэтажного корпуса» предполагалось отремонтировать еще «два

жилых и два нежилых одноэтажных флигеля». В свою очередь план 1814 г. засвидетельствовал присутствие на территории ядра усадьбы исключительно каменных построек: трехэтажной, двухэтажных и одноэтажных (рис. 3) [5]. Тот факт, что после пожара их собирались «*поправить*» и устроить на этих зданиях кровлю [6], позволяет уверенно полагать, что в первое десятилетие XIX в. все эти сооружения являлись каменными постройками, среди которых был и восточный флигель усадьбы.

О характере объемно-пространственной композиции домовладения, сложившейся в первое десятилетие XIX в., достаточно определенно свидетельствуют планы усадьбы, выполненные в 1814 [7] и 1824 гг. Наиболее подробен чертеж середины 1820-х гг. (рис. 4) [7], где восточная граница участка оформлена несколькими зданиями: сложной формы Г-образной северо-восточной постройкой, восточный объем которой вместе с восточным прямоугольным в плане флигелем формировали восточную парковую границу ансамбля. Северный и восточный флигели были объединены оградой, вероятно, имевшей входную группу с парковыми воротами, о чем косвенно свидетельствует мост через реку, устроенный на центральной оси курдонера главного дома. При этом отметим, что остальные участки ограды, расположенные по периметру домовладения, показаны без проездов, хотя таковые, очевидно, существовали и с севера, и с запада. Но благодаря фланкирующим восточный въезд флигелям парадный двор раскрывался в сторону пруда, а впоследствии и сада в качестве симметричной композиции.

Новый этап в судьбе восточного флигеля наступил, вероятно, в середине 1830-х гг., когда на территории усадьбы разместилась 2-я Московская гимназия. Работы по приспособлению усадьбы под учебное заведение проводились Строительным комитетом при Московском университете и были завершены в июле 1836 г. Часть флигелей адаптировали под жилье для гимназических служащих, остальные отданы под хозяйственные нужды. В 1843 г. был засыпан пруд в саду в восточной части бывшей усадебной территории, поскольку «*...грязная вода с улиц стекала в него и заражала воздух*» [7].

Несмотря на отдельные иконографические и письменные свидетельства XIX в., в целом вплоть до начала XX столетия строительная история восточного гимназического флигеля остается практически неизвестной. Может быть, это связано с тем, что каких-то существенных изменений в этот период здесь не происходило, если не считать вполне естественных для любой постройки поновлений и ремонтов.

Что касается назначения восточного флигеля, то он, вероятно, обладал смешанной функцией. Часть его, как указано на плане 1913 г., именовалась «сараем», а другая, судя по планировке и обилию печей, могла использоваться под жилье. Можно предположить, что изначально он мог служить каретным сараем в усадьбе Мусина-Пушкина, однако подтверждения данной версии найти не удалось.

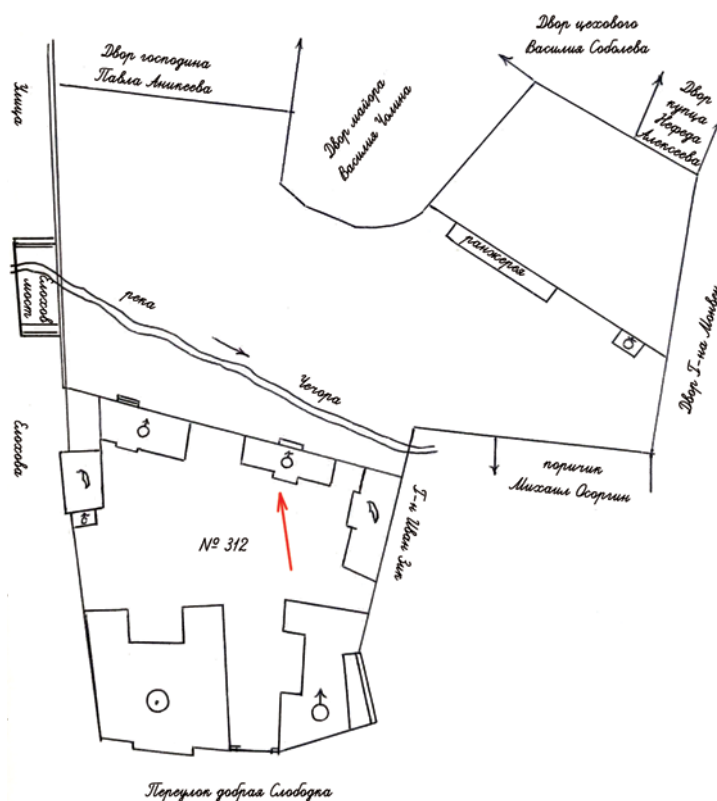


Рис. 3. Москва. Восточный флигель усадьбы «Алексея Ивановича Мусина Пушкина и супруги ево графини Екатерины Алексеевны» в «Басманной части 3-го квартала под № 312». 1814 г. ЦГА Москвы. Ф. 163. Оп. 5. Д. 18. Л. 22

Fig. 3. Moscow. The eastern wing of the “Aleksey Ivanovich Musin Pushkin and his wife Countess Ekaterina Alekseevna” estate in “Basmannaya part of the 3rd quarter under the former number of 312th”. 1814 Central State Archive of Moscow. Fund 163. L. 5 File 18 Sheet 22



Рис. 4. Москва. Восточный флигель 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. 4. Moscow. The eastern wing on 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 Central State Archive of Moscow. Fund T-1. L. 2 File 173 (437/291; 2)

В 1910-е гг. параллельно северному флигелю был поставлен трехэтажный, вытянутый по оси восток-запад корпус, примкнувший к северному ризалиту главного дома и к западной части северного флигеля, перекрыв таким образом двор усадьбы и разделив ее на две неравные части (рис. 5) [8]. Осенью 1917 г. гимназия была закрыта. Здесь разместили военный госпиталь, а затем Дом Красной Армии, а в 1923 г. в бывшей усадьбе Мусина-Пушкина обосновался индустриально-педагогический институт имени Карла Либкнехта [9].

Глобальные преобразования и наибольший урон ансамблю усадьбы принесли строительные работы 1930-х гг. Эти мероприятия были направлены на увеличение главного дома и здания гимназии 1910-х гг.

постройки. Основной корпус получил дополнительный четвертый этаж и новую четырехэтажную пристройку с севера, для чего разобрана значительная часть северного флигеля [10]. Восточный флигель перестроили в 1936 г. под больничные кабинеты и библиотеку [11]. Возможно, в это время выполнена его надстройка вторым этажом с переходом в соседнее четырехэтажное строение. Здание получило широкие оконные проемы и новую планировочную структуру.

В 1943 г. педагогический институт вошел в состав Московского государственного педагогического института им. В.И. Ленина, «а дом на Разгуляе отдала вернувшемуся из эвакуации в Москву инженерно-строительному институту имени В.В. Куйбышева» [4].

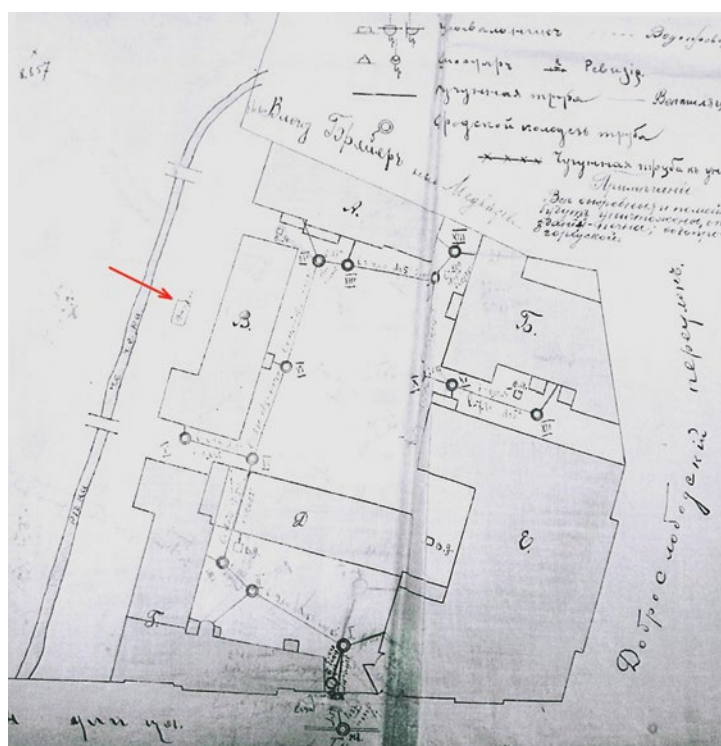


Рис. 5. Москва. Восточный флигель на плане участка Второй Московской гимназии. 1913 г. Архив Мосводоканала. РКС. № 2 СЭ № 2. Д. 636. Л. 2

Fig. 5. Moscow. Eastern wing on the plane of the site of 2nd Moscow gymnasium. 1913. Mosvodokanal Archive. Sanitation District No. 2 Maintenance Service No. 2 File 636. L. 2

Приспособление комплекса под нужды института повлекло за собой изменения внутренней планировочной структуры основного здания усадьбы и флигелей, в которых разместились лаборатории. Впоследствии восточный флигель оброс пристройками, а пространство между восточной стеной флигеля и оградой было перекрыто кровлей, в результате чего значительная часть конструкции XIX в. оказалась в интерьере более позднего объема.

Рассматривая строительную периодизацию объекта, можно выделить три основных строительных периода.

I период

Первое десятилетие XIX в. Строительство каменной постройки на месте снесенной более ранней деревянной, что было зафиксировано планом 1824 г. Интересно, что в тот период рассматриваемое здание посредством изящно решенной входной группы соединялось оградой с северным флигелем, оформляя вход на территорию усадьбы со стороны парка. Таким образом, сформировалась парковая линия застройки, где восточный флигель, наряду с северным, составлял общую композицию, центром которой был вход

(въезд), ориентированный по центральной оси курдонера главного дома.

II период (основной)

1830-е гг. Период переустройства зданий усадьбы, перешедших в ведение 2-й Московской гимназии. Вероятно, в это время появляется ризалит на парковом фасаде здания, что связано с приспособлением хозяйственного флигеля под жилые помещения. По этой же причине устраиваются дополнительные проемы и меняется внутренняя структура корпуса. Характерно, что в тот период и северный флигель получает симметричный восточному ризалит. В результате сохраняется заданная в начале XIX столетия планировочная структура усадьбы с ориентацией парковой входной группы на центральную ось главного дома, а общую фасадную плоскость строений подчеркивают центральные парковые ворота.

III период

Вторая треть XX в. В это время здание обрастает многочисленными пристройками, полностью перерабатывается его планировочная структура, устраивается ряд дополнительных дверных и оконных проемов. Сооружение надстраивается вторым этажом и увязывается переходом с соседним корпусом 1930-х гг.

Вероятно, преобразования второй трети XX столетия сыграли решающую роль в судьбе рассматриваемого нами здания, не оставив и намека на причастность его объемов к истории ансамбля, что и повлияло на решение органов охраны не включать постройку в реестр объектов культурного наследия.

Проведенные в настоящее время исследования выявили ряд артефактов, позволяющих сделать вывод, что в основе данного строения лежит объем начала XIX в. Анализируя библиографические материалы, можно проследить определенную конфигурацию несущих стен постройки, составляющих объемные параметры здания. Подобная конфигурация прослеживается и сегодня. Это вытянутый Г-образный объем, сформированный несущими кирпичными стенами, частично скрытыми более поздними пристройками. Стены начала XIX в. были зафиксированы на первом этаже здания. Они выполнены из полнотелого керамического кирпича на известково-песчаном растворе. В то время как стены второго этажа полностью сложены из силикатного кирпича на цементном растворе и, очевидно, возведены во второй трети XX в. Первоначальные конструкции отличаются, прежде всего, толщиной и способом кирпичной кладки. Они сложены верстовым способом, что характерно для первой трети XIX столетия [12]. Также в составе стен обнаружены подлинные оконные проемы с кирпичными клинчатыми перемычками (рис. 6). Подобная кладка была зафиксирована и на других постройках усадьбы, в частности в соседнем северном флигеле, датированном первым десятилетием XIX в. [13].



Рис. 6. Москва. Восточный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице. Фрагмент стены (с арочной перемычкой) в интерьере здания. Фото 2022 г.

Fig. 6. Moscow. The eastern wing of the Musin-Pushkin estate on the Spartakovskaya str. Wall fragment (with arched lintel) from interior. Photo of 2022



Рис. 7. Москва. Восточный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице. Пята арочного проема, выявленная зондажом на западном фасаде здания. Фото 2022 г.

Fig. 7. Moscow. The eastern wing of the Musin-Pushkin estate on the Spartakovskaya str. Springing of the archway, which was founded by probing on the west façade. Photo of 2022

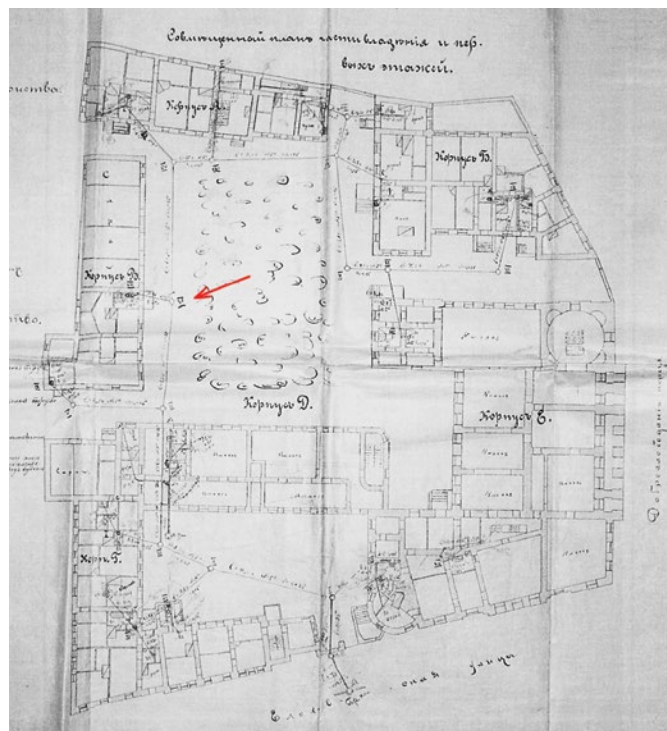


Рис. 8. Москва. Вторая Московская гимназия. Общий план комплекса и планы строений на уровне первого этажа. 1913 г. Архив Мосводоканала. РКС. № 2 СЭ № 2. Д. 636. Л. 2

Fig. 8. Moscow. 2nd Moscow Gymnasium (Musin-Pushkin Estate). General plan of the complex and ground-floor plans of buildings. 1913. Mosvodokanal Archive. Sanitation District No. 2 Maintenance Service No. 2 File 636. L. 2

Значимым элементом, выявленным в ходе проведения исследования, был фрагмент кирпичной арки с пятой, расположенный на западном фасаде здания (рис. 7). Зафиксировав его местоположение в плоскости фасада, опираясь на габариты и заданную дугу арки, удалось смоделировать облик проема начала XIX в. и определить его параметры. По всей видимости, этот фрагмент арки является частью арочно-го воротного проема полуциркульной формы. Такие широкие арки, зафиксированные на плане 1913 г., вели в хозяйственные помещения постройки. По результатам натурных исследований можно предположить, что таких проемов было три, а не два, как показывает план 1913 г. (рис. 8) [14]. Вероятно, один из этих проемов к тому времени был уже частично заложен и переделан в дверной (рис. 9).

Получив таким образом параметры данных проемов, опираясь на материалы историко-архивных исследований, можно предположить характер оформления фасадов и ритм световых осей. Стоит отметить, что реконструируемый облик Г-образного в плане здания оказывается симметричен расположенному по соседству северному флигелю [4], поэтому с полным основанием можно утверждать, что типологически близкие сооружения формировали объемно-пространственную композицию восточной границы усадьбы.

Рассматривая полученные данные в кругу аналогичных, типологически близких построек, следует

обратиться к Архитектурным альбомам М.Ф. Казакова, собравшим в своем составе значительное количество отдельных построек и ансамблей исследуемого периода. Типологически близкие объемы можно видеть на плане таких домовладений, как: дом Н.Е. Мясникова на Б. Дмитровке в Москве, конец XVIII в. (рис. 10); дом Мусиной-Пушкиной на Тверской (угол Долгоруковского пер.) в Москве, построен после 1797 г. (рис. 11); дом Н.А. Чирикова в Соляном проезде в Москве, конец XVIII в. (рис. 12); дом Тутолмина на Швивой горке в Москве, конец XVIII в. (рис. 13); дом М.М. Голицына на Большой Дмитровке в Москве (против Георгиевского переулка), показан на плане квартала 1777 г. (рис. 14); дом В.П. Салтыкова на Тверской (на углу Газетного переулка) в Москве, 1-я пол. XVIII в. (рис. 15); дом А.В. Шереметева в Леонтьевском переулке в Москве [15, 16] (рис. 16). Так, рассматривая приведенные примеры, можно выделить присутствие аналогичного по планировочной структуре здания в составе указанных домовладений. Общей чертой данных построек является наличие на дворовом фасаде трех широких проемов, вероятно, являющихся воротами. Реже встречаются постройки, имеющие пять проемов (рис. 12, 16). Не имея внутренней планировочной структуры, справедливо предположить, что данные постройки имеют хозяйственное назначение, в отдельных примерах совмещенное с жилыми объемами.



Рис. 9. Москва. Усадьба Мусиных-Пушкиных. Строительная периодизация восточного флигеля и северо-восточной части домовладения в структуре сложившейся застройки. Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

Fig. 9. Moscow. The Musin-Pushkin estate. Construction periodization of the eastern wing and northeastern part of the household, surrounded by existing buildings. Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU

Также стоит обратить внимание на расположение данных строений в структуре ансамбля. В преобладающем большинстве эти постройки формируют заднюю (дворовую) или боковые стороны домовладения, а зачастую и соединяются проездом проездом, в том числе и с воротами с симметричными им объемами. В отдельных случаях прослеживается ориентация входной группы на ось главного дома домовладения (рис. 11, 13, 14, 16).

Данные приемы в формировании планировочной структуры домовладения прослеживаются и в усадьбе Мусиных-Пушкиных, что позволяет рассматривать приведенные выше примеры в качестве типологически близких при разработке графической реконструкции восточного флигеля усадьбы в структуре ансамбля в целом.

Рассматривая фасады подобных сооружений в хронологических рамках исследуемого домовладения, необходимо обратить внимание на «Собрание фасадов, Его Императорским Величеством высочайше опробованных для частных строений в городах Российской империи», где представлены варианты типологически близких построек [4] (рис. 17). Подобные по стилистике сооружения можно видеть и в приведенном ранее Архитектурном альбоме М.Ф. Казакова (рис. 10).

Таким образом, полученные материалы историко-библиографических и натурных исследований, рассмотренные в кругу типологически и стилистически близких строений, позволяют предложить исторический облик восточного флигеля усадьбы и его роль в структуре ансамбля в целом (рис. 18).

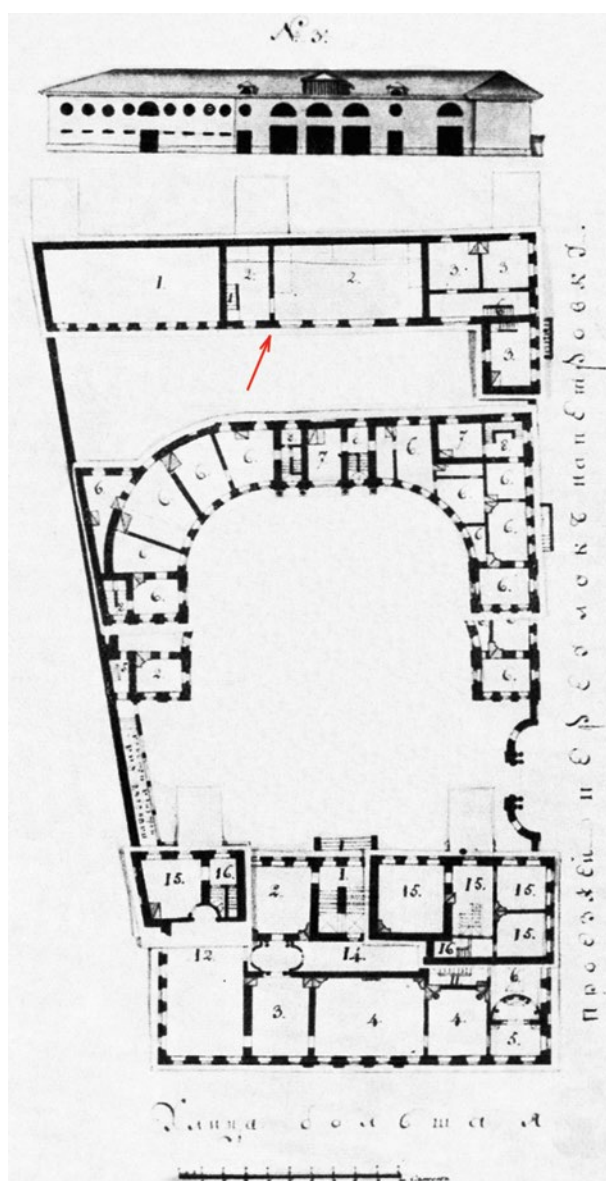


Рис. 10. Москва. Дом Н.Е. Мясникова на Б. Дмитровке, конец XVIII в. Опубликовано: Е.А. Белецкая «Архитектурные альбомы М.Ф. Казакова». М., 1956. С. 149.

Fig. 10. Moscow. N. E. Myasnikov House on Bolshaya Dmitrovka Street. Built at the end of XVIII s. Published by E.A. Beletskaya Architectural albums by M.F. Kazakov. Moscow, 1956. P. 149

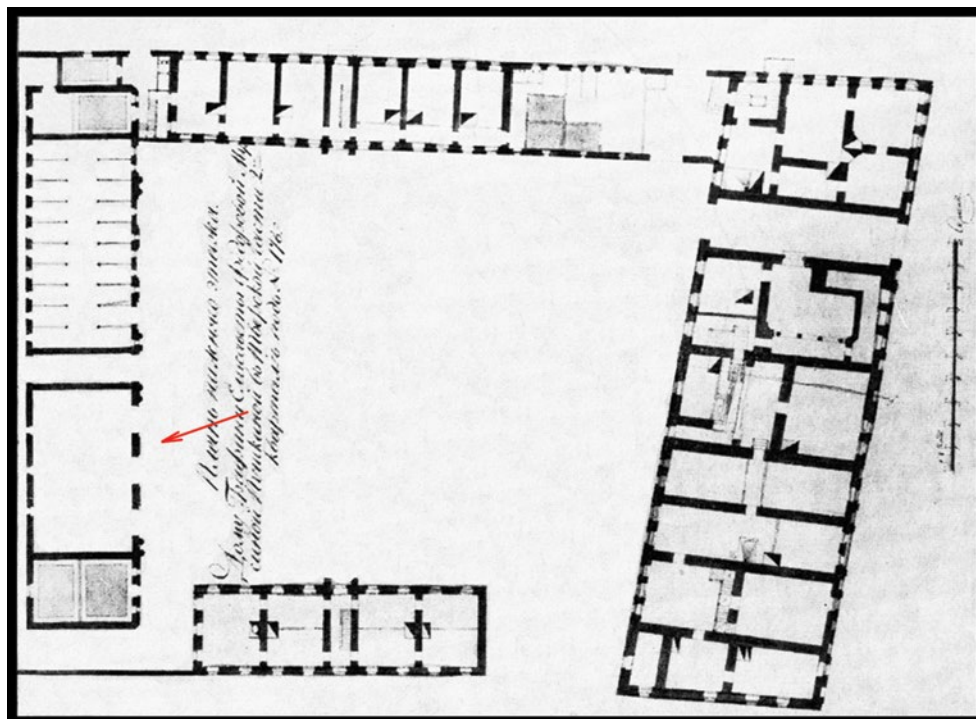


Рис. 11. Москва. Дом Мусиной-Пушкиной на Тверской (угол Долгоруковского пер.), построен после 1797 г. Опубликовано: Е.А. Белецкая «Архитектурные альбомы М.Ф. Казакова». М., 1956. С. 84.

Fig. 11. Moscow. Musina-Pushkina House on Tverskaya Street (Corner of the Dolgorukovskiy Lane). Built after 1797's. Published by E.A. Beletskaya Architectural albums by M.F. Kazakov. Moscow, 1956. P. 84

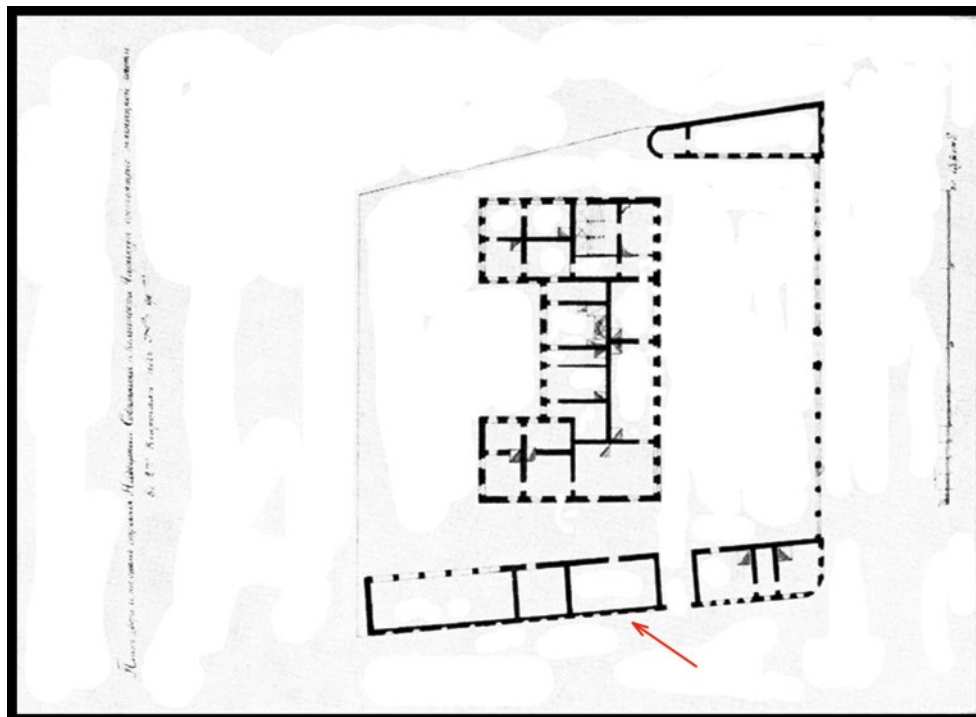


Рис. 12. Москва. Дом Н.А. Чирикова в Соляном проезде, конец XVIII в. Опубликовано: Е.А. Белецкая «Архитектурные альбомы М.Ф. Казакова». М., 1956. С. 131.

Fig. 12. Moscow. N.A. Chirikov House on Solyaniy Fairway. Built at the end of XVIII s. Published by E.A. Beletskaya Architectural albums by M.F. Kazakov. Moscow, 1956. P. 131

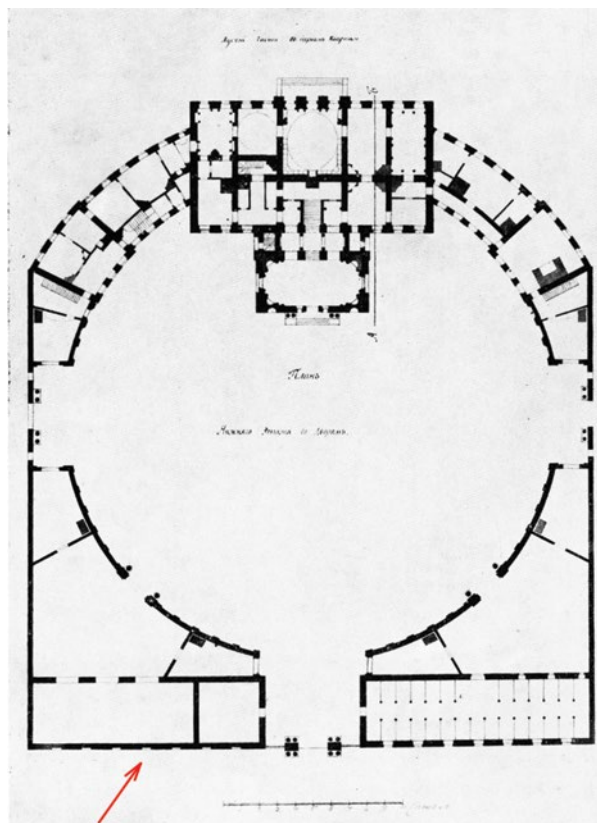


Рис. 13. Москва. Дом Тутолмина на Швивой горке, конец XVIII в. Опубликовано: Е.А. Белецкая «Архитектурные альбомы М.Ф. Казакова». М., 1956. С. 108–111

Fig. 13. Moscow. Tutomlin House on Shvivaya Grade. Built at the end of XVIII s. Published by E.A. Beletskaya Architectural albums by M.F. Kazakov. Moscow, 1956. Pp. 108–111

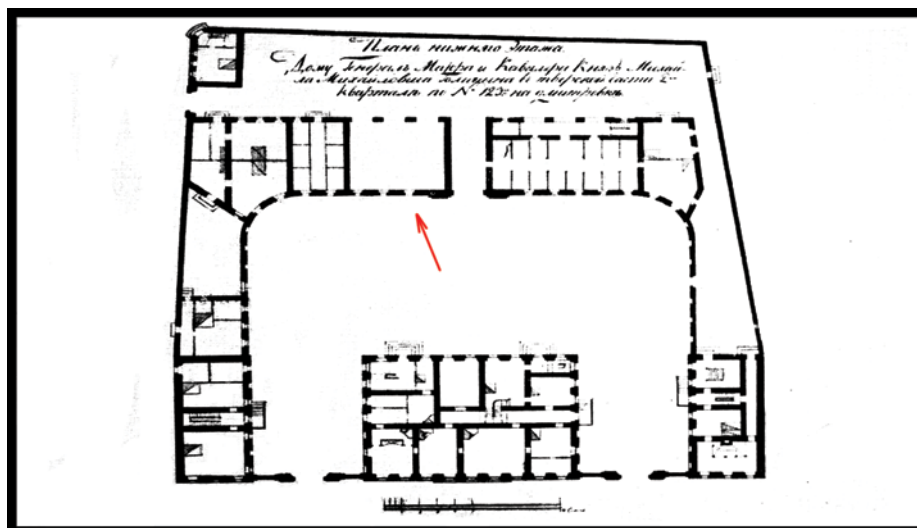


Рис. 14. Москва. Дом М.М. Голицына на Большой Дмитровке (против Георгиевского переулка), показан на плане квартала 1777 г. Опубликовано: Е.А. Белецкая «Архитектурные альбомы М.Ф. Казакова». М., 1956. С. 150

Fig. 14. Moscow. M.M. Golit'sin House on Bolhaya Dmitrovka Street (opposite Georgievskiy Lane), the quarter showed on a site plan of 1777 y. Published by E.A. Beletskaya Architectural albums by M.F. Kazakov. Moscow, 1956. P. 150

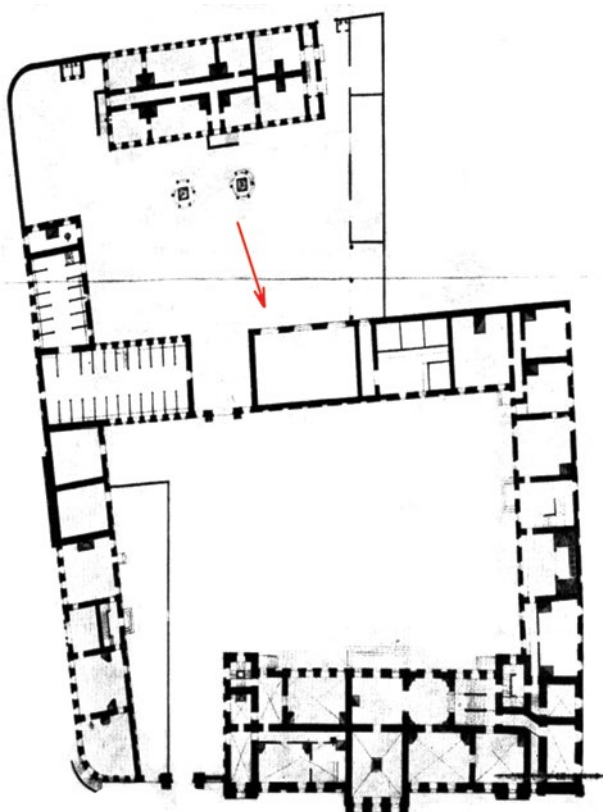


Рис. 15. Москва. Дом В.П. Салтыкова на Тверской (на углу Газетного переулка), 1-ая пол. XVIII в. Опубликовано: Е.А. Белецкая «Архитектурные альбомы М.Ф. Казакова». М., 1956. С. 152–153

Fig. 15. Moscow. V.P. Saltikov House on Tverskaya Street (at the corner of Gazetnyi Lane), 1st quarter of the XVIII s. Published by E.A. Beletskaya Architectural albums by M.F. Kazakov. Moscow, 1956. Pp. 152–153

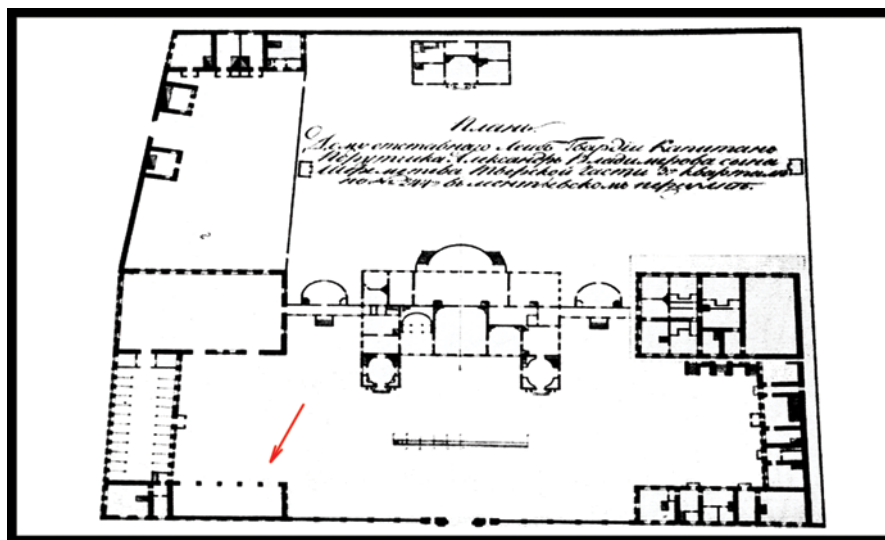


Рис. 16. Москва. Дом А.В. Шереметева в Леонтьевском переулке. Центральный деревянный корпус построен после 1775 г., так как на плане Москвы 1775 г. не показан. Каменные флигели по улице, ограда и дворовые строения относятся к первой половине XVIII в. (имеются на плане 1775 г.). Опубликовано: Е.А. Белецкая «Архитектурные альбомы М.Ф. Казакова». М., 1956. С. 154

Fig. 16. Moscow. A.V. Sheremetev House on Leont'evskiy Lane. Central wood wing was built after 1775 y., because we can't see it at the Moscow site plan of 1775 y. Mason wings along the street, the fence and the yard constructions are related to the 1st half of the XVIII s. (because they are at the 1775 y. site plan). Published by E.A. Beletskaya Architectural albums by M.F. Kazakov. Moscow, 1956. P. 154

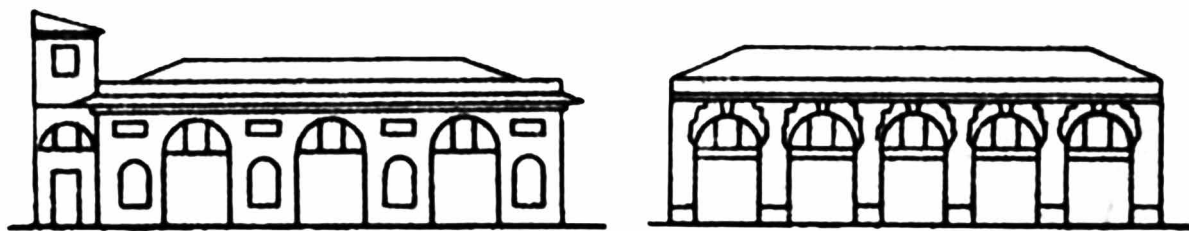


Рис. 17. Собрание фасадов, Его Императорским Величеством высочайше опробированных для частных строений в городах Российской империи. Фасады 2-го, 3-го и 4-го альбомов. 1812 г. Опубликовано: в С.С. Ожегов «Типовое и повторное строительство в России в XVIII–XIX веках». М., 1984. С. 91

Fig. 17. Collection of facades for private buildings in Russian empire cities, highly approved by His Imperial Majesty. Facades of the 2nd, 3rd and 4th albums. 1812. Published: S.S. Ozhegov “Standart and repeated construction in Russia in XVIII–XIX centuries”. Moscow, 1984. Sheets 91



Рис. 18. Москва. Усадьба Мусиных-Пушкиных. Дворовый (западный) фасад восточного флигеля. Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

Fig. 18. Moscow. The Musin-Pushkin estate. Yard (western) facade of the eastern wing. Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU

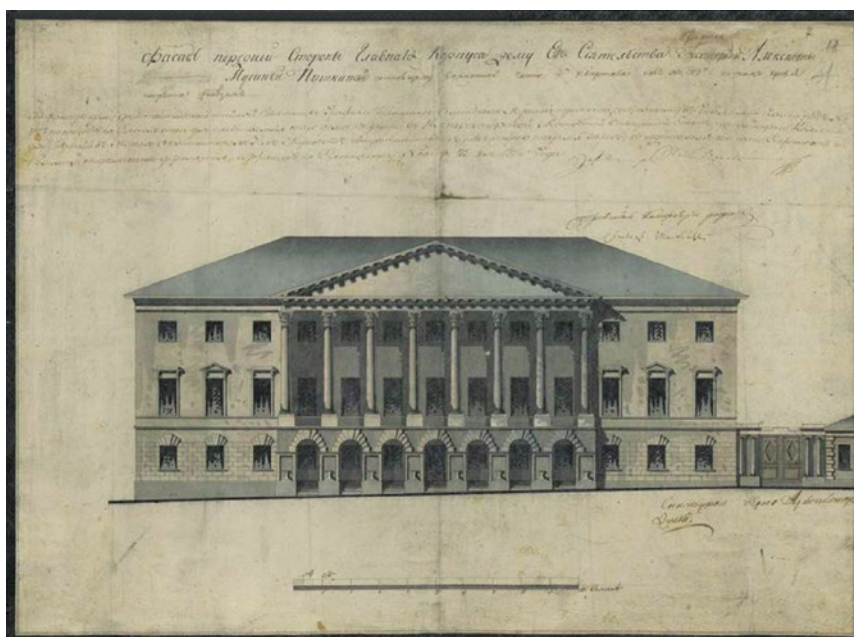


Рис. 19. Москва. Усадьба Мусиных-Пушкиных. Проект главного дома с воротами. Главный (западный) фасад. 1830-е гг. Материалы из частной коллекции

Fig. 19. Moscow. The Musin-Pushkin estate. Project of the main house with gates. Main (western) facade. 1830th. Private collection materials

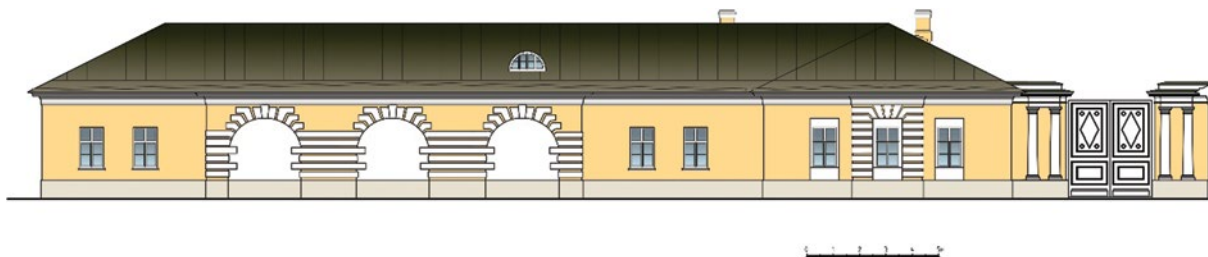


Рис. 20. Москва. Усадьба Мусиных-Пушкиных. Парковый (восточный) фасад восточного флигеля. Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

Fig. 20. Moscow. The Musin-Pushkin estate. Park (eastern) facade of the eastern wing. Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU



Рис. 21. Москва. Усадьба Мусиных-Пушкиных. Фронт застройки по восточной (парковой) границе домовладения. Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

Fig. 21. Moscow. The Musin-Pushkin estate. Building front of the eastern (park) boarder of the household. Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU

Воссоздавая фронт застройки паркового фасада, отдельное внимание стоит уделить центральному элементу композиции, объединявшему два отдельно стоящих здания. Это входная группа, оформляющая вход на территорию домовладения со стороны парка. Не имея в настоящее время точных сведений об архитектурных формах этого сооружения, следует обратить внимание на прямой аналог, некогда оформлявший проезд во двор усадьбы с запада. Его зафиксировал проект 1830-х гг. (рис. 19) [15]. Это входная группа, располагавшаяся между южным флигелем и главным домом усадьбы, и представлявшая собой деревянное филанчатое полотно ворот, фланкированное кирпичными пилонами со сдвоенными полуколоннами, завершенными капителями дорического ордера. Подобное оформление ворот можно видеть и в представленных в архитектурном альбоме М.Ф. Казакова материалах. Это ограды домов Плещеева и Куракина на Новой Басманной, Ермолова на Тверской, Губина на Петровке, Безсонова на Никитской, Салтыкова на Тверской, Голицина на Большой Дмитровке, Барышникова на Мясницкой, Демидова на Новой Басманной [16]. Рассмотрев оформление входной группы в кругу аналогичных построек, можно предположить, что восточные (парковые) ворота были типологически близки западной входной группе домовладения (рис. 20).

Что касается цветового решения, то ориентируясь на окружающую застройку усадьбы, в частности северный флигель, можно предположить, что отдел-

ка восточного флигеля в первой половине XIX в. была аналогичной, т.е. его стены покрывала желтая охра по тонкой известковой обмазке.

Важной особенностью данной постройки является ее место в структуре ансамбля, выраженной в симметричном размещении по отношению к северному флигелю усадьбы. Своими восточными фасадами обе постройки формировали парковую «фасад» усадьбы. Увязанные с композиционной осью комплекса (частью которой был и мостик через речку), они подчеркивали архитектурные достоинства входной группы со стороны парка и служили важным звеном в объемно-пространственной структуре ансамбля в целом (рис. 21).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенная графическая реконструкция восточного флигеля, вне всякого сомнения, содержит ряд допущений, однако выявленный объем подвергнувшись неоднократным перестройкам флигеля, а также многочисленный архитектурный контекст, состоящий из хронологически, стилистически и типологически близких сооружений, дают основание рассматривать ее в качестве наиболее приемлемого варианта восстановления данного сооружения.

Выбранная концепция позволит не только полноценно представить архитектурный облик конкретного объекта, но и воссоздать часть исторического полотна застройки, что положительно отразится на восприятии ансамбля в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белицкий Я.М. Спартаковская улица, 2/1. М., 1986. С. 10–11.
2. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1730. 1995 г. Л. 4.
3. 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
4. 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
5. ЦГА Москвы. Ф. 105. Оп. 1. Д. 635. Л. 3.
6. ЦГА Москвы. Ф. 171. Оп. 1. Д. 281. Л. 2.
7. ЦГА Москвы. Ф. 163. Оп. 5. Д. 18. 1814 г. Л. 22.
8. ЦГА Москвы. Ф. Т-1. Оп. 2. Д. 173 (437/291; 2).
9. Белицкий Я.М. Спартаковская улица, 2/1. М., 1986. С. 33–35.
10. Архив Мосводоканала. РКС № 2 СЭ № 2. Д. 636. Л. 2. План участка. 1913 г.
11. Белицкий Я.М. Спартаковская улица, 2/1. М., 1986. С. 33–53.
12. Архив МГСУ. Дом Мусина-Пушкина, три флигеля и ограда. Историко-архитектурное обследование домовладения. Т. 1. ООО «Арсимум». М., 2011. С. 52.
13. Белицкий Я.М. Спартаковская улица, 2/1. М., 1986. С. 58.
14. Киселев И.А. Архитектурные детали в русском зодчестве XVIII–XIX веков. Справочник архитектора-реставратора. М.: Academia, 2005. С. 219–220, 221–222.
15. Белецкая Е.А. Архитектурные альбомы М.Ф. Казаков. М.: Госстройиздат, 1956. С. 84, 108–111, 131, 149, 150, 152–153, 154.
16. Ожегов С.С. Типовое и повторное строительство в России в XVIII–XIX веках. М.: Стройиздат, 1984. С. 91.

Поступила в редакцию 22 июля 2022 г.

Принята в доработанном виде 10 октября 2022 г.

Одобрена для публикации 11 октября 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: **Тимур Викторович Иванцык** — архитектор-реставратор I категории, член Союза реставраторов России, главный архитектор проектов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; timurahc@yandex.ru;

Алексей Маратович Салимов — доктор искусствоведения, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), профессор; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 428091; sampochta@mail.ru.

Вклад авторов:

Иванцык Т.В. — концепция исследования, автор натурных исследований и концепции проекта реставрации.

Салимов А.М. — научное руководство, автор историко-библиографических исследований.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Belitskiy Y.M. *Spartakovskaya street, 2/1*. Moscow, 1986; 10–11. (rus.).
2. Moscow Central State Archive. Fund T-125. L. 4. File 1730. 1995; 4. (rus.).
3. 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.).
4. 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.).
5. Moscow Central State Archive. Fund 105. L. 1. File 635. Sheet 3; 3. (rus.).
6. Moscow Central State Archive. Fund 171. L. 1. File 281. Sheet 2. (rus.).
7. Moscow Central State Archive. Fund 163. L. 5. File 18. 1814; 22. (rus.).
8. Moscow Central State Archive. Fund T-1. L. 2. File 173 (473/291; 2). (rus.).
9. Belitskiy Y.M. *Spartakovskaya street, 2/1*. Moscow, 1986; 33–35. (rus.).
10. [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):547–558. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.547-558 (rus.).
11. Moscow Central State Archive. Fund 105. L. 1. File 635. Sheet 3; 3. (rus.).
12. Moscow Central State Archive. Fund 171. L. 1. File 281. Sheet 2. (rus.).
13. Moscow Central State Archive. Fund 163. L. 5. File 18. 1814; 22. (rus.).
14. Moscow Central State Archive. Fund T-1. L. 2. File 173 (473/291; 2). (rus.).
15. Belitskiy Y.M. *Spartakovskaya street, 2/1*. Moscow, 1986; 33–35. (rus.).
16. Kiselev I.A. Architectural details in Russian architecture of the XVIII–XIX centuries. Reference book for the architect-restorer. M.: Academia, 2005. P. 219–220, 221–222.
17. Belecкая E.A. Architectural albums of M.F. Kazakov. M.: Gosstroyizdat, 1956. P. 84, 108–111, 131, 149, 150, 152–153, 154.
18. Ozhegov S.S. Typical and repeated construction in Russia in the XVIII–XIX centuries. M.: Stroyizdat, 1984. P. 91.

10. Mosvodokanal Archive. Sanitation District No. 2 Maintenance Service No. 2 File 636. L.2 Area plan. 1913. (rus.).
11. Belitskiy Y.M. *Spartakovskaya street, 2/1*. Moscow, 1986; 33-35. (rus.).
12. *Archive of the Moscow State University of Civil Engineering (MGSU). The Musin-Pushkin Estate, three wings and the fence. Historical and architectural study of the house and grounds. Vol. 1. Arsimum LLC*. Moscow, 2011; 52. (rus.).
13. Belitskiy Y.M. *Spartakovskaya street, 2/1*. Moscow, 1986; 58. (rus.).
14. Kiselev I.A. *Architectural details in Russian architecture of the 18th – 19th centuries. Conservation Architect's Reference*. Moscow, Academia, 2005; 219-220, 221-222. (rus.).
15. Beletskaya E.A. *Architectural albums M.F. Kazakov*. Moscow, Gosstroyizdat, 1956; 84, 108-111, 131, 149, 150, 152-153, 154. (rus.).
16. Ozhegov S.S. *Standart and repeated construction in Russia in XVIII-XIX centuries*. Moscow, Stroyizdat, 1984; 91. (rus.).

Received July 22, 2022.

Adopted in revised form on October 10, 2022.

Approved for publication on October 11, 2022.

B I O N O T E S : **Timur V. Ivantsyk** — architect-restorer of the 1st category, member of the Union of Restorers of Russia, chief architect of projects; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; timurahe@yandex.ru;

Aleksey M. Salimov — Doctor of Arts, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN), Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 428091; sampochta@mail.ru.

Contribution of the authors:

Timur V. Ivantsyk — research concept, author of full-scale research and the concept of the restoration project.

Aleksey M. Salimov — scientific guidance, author of historical and bibliographic studies.

The authors declare that there is no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 624.04:531.391.3
DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1324-1330

Кинематический анализ и оценка частоты собственных колебаний плоской решетки

Михаил Николаевич Кирсанов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Статически определяемая регулярная симметричная прямоугольная решетка закреплена на двух опорах. Масса решетки распределена по ее узлам. Приводится кинематический анализ, выявляющий изменяемость решетки при некотором числе панелей. Описан алгоритм поиска распределения виртуальных скоростей узлов решетки в этом случае. Выводится формула зависимости нижней оценки первой частоты собственных колебаний конструкции от числа панелей из области допустимых значений.

Материалы и методы. Расчет усилий в стержнях статически определяемой решетки выполняется методом вырезания узлов с применением операторов системы компьютерной математики Maple. Для определения жесткости конструкции используется формула Максвелла – Мора в предположении, что модули упругости и площади сечений всех стержней решетки одинаковы.

Результаты. Показано, что при числе панелей, кратном трем, определитель матрицы системы уравнений равновесия вырождается, и система становится мгновенно изменяемым механизмом. Приводится соответствующая картина распределения скоростей узлов. С использованием приближенной оценки Донкерлея выводится формула зависимости нижней границы первой частоты колебаний фермы от числа панелей. Обобщение серии частных решений на произвольное число панелей осуществляется в системе Maple методом индукции.

Выводы. Предлагаемая модель решетки допускает аналитическое решение для нижней оценки первой собственной частоты. Сравнение результата с численным решением, полученным для наименьшей частоты всего спектра частот собственных колебаний решетки, показывает его высокую точность. Продемонстрировано, что погрешность найденной аналитической оценки падает с увеличением числа панелей. Решение может быть использовано в задачах оптимизации и для предварительной оценки проектируемой конструкции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: решетка, ферма, первая собственная частота, оценка Донкерлея, кинематическая изменяемость, формула Максвелла – Мора, индукция, парциальная частота

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-21-00473).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кирсанов М.Н. Кинематический анализ и оценка частоты собственных колебаний плоской решетки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 10. С. 1324–1330. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1324-1330

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

Kinematic analysis and estimation of the frequency of natural oscillations of a planar lattice

Mikhail N. Kirsanov

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

ABSTRACT

Introduction. A statically determined regular symmetrical rectangular lattice is fixed on two supports. The mass of the lattice is distributed over its nodes. A kinematic analysis is presented that reveals the variability of the lattice for a certain number of panels. An algorithm for searching for the distribution of virtual velocities of lattice nodes in this case is described. A formula is derived for the dependence of the lower estimate of the first frequency of natural oscillations of the structure on the number of panels from the range of permissible values.

Materials and methods. Calculation of forces in the bars of a statically determinate lattice is performed by the method of cutting out nodes using Maple computer mathematics system operators. To determine the rigidity of the structure,

the Maxwell – Mohr formula is used on the assumption that the elastic moduli and cross-sectional areas of all lattice rods are the same.

Results. It is shown that when the number of panels is a multiple of three, the determinant of the matrix of the system of equilibrium equations degenerates, and the system becomes an instantly variable mechanism. A corresponding picture of the distribution of knot velocities is given. Using the approximate Dunkerley estimate, a formula is derived for the dependence of the lower limit of the first oscillation frequency of the truss on the number of panels. The generalization of a series of particular solutions to an arbitrary number of panels is performed in the Maple system by induction.

Conclusions. The proposed lattice model admits an analytical solution for the lower estimate of the first natural frequency. Comparison of the result with the numerical solution obtained for the lowest frequency of the entire frequency spectrum of natural lattice vibrations shows its high accuracy. It is shown that the error of the found analytical estimate decreases with an increase in the number of panels. The solution can be used in optimization problems and for a preliminary assessment of the designed structure.

KEYWORDS: lattice, truss, first natural frequency, Dunkerley estimate, kinematic variability, Maxwell – Mohr formula, induction, partial frequency

Acknowledgments. The work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 22-21-00473).

FOR CITATION: Kirsanov M.N. Kinematic analysis and estimation of the frequency of natural oscillations of a planar lattice. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(10):1324-1330. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1324-1330 (rus.).

Corresponding author: Mikhail N. Kirsanov, c216@ya.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Решетчатые конструкции широко используются в машиностроении в качестве несущих элементов, ограждений и элементов кожухов. Анализ частот собственных колебаний решеток важен для оценки работоспособности механизма в целом. Широко распространенной моделью инерционных свойств решетки является распределение ее массы по узлам. Как правило, частоты колебаний решеток в виде плоских или пространственных ферм рассчитываются численно [1–3]. Однако в некоторых случаях возможны и аналитические оценки первой частоты собственных колебаний. В исследованиях [4–6] получены такие оценки для плоских конструкций, в [7] — для пространственных. В настоящей работе рассматривается плоская статически определимая решетка регулярного типа с массами, распределенными равномерно по всем узлам (рис. 1). Ставится задача вывести формулу зависимости нижней оценки первой собственной частоты от числа панелей. Некоторые

решения задачи статики подобных регулярных конструкций с произвольным числом панелей содержатся в справочнике [8] и трудах [9–12]. Получены аналитические решения в тригонометрических рядах для элементов конструкции [13, 14]. Проблемы регулярных статически определимых стержневых систем проанализированы в публикациях [15, 16].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Схема. Расчет усилий

Число условных панелей решетки по ее верхнему поясу равно n . В аналогичных решетках строительных конструкций (фермах) раскосы расположены в разных плоскостях и не пересекаются. Здесь же пересечения раскосов соединены шарнирами. Длины всех наклонных элементов решетки одинаковы $c = \sqrt{a^2 + h^2}$. Всего в ферме содержится $4(n + 1)$ узлов и $N = 8n + 5$ стержней. Решетка по краям крепится на подвижную шарнирную опору и неподвижную.

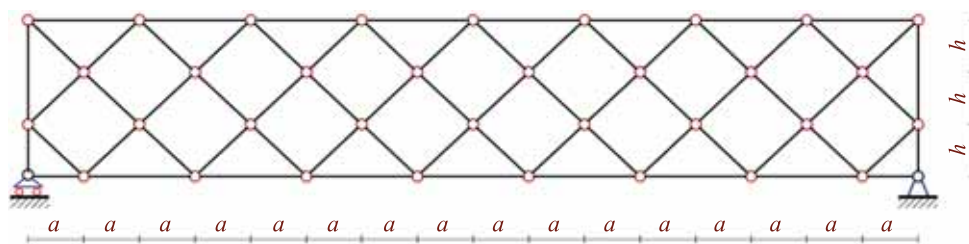


Рис. 1. Решетка при $n = 8$

Fig. 1. The lattice, $n = 8$

Усилия в стержнях статически определимой решетки при действии на нее внешних нагрузок находятся методом вырезания узлов из решения системы алгебраических уравнений равновесия в проекции на оси координат. Система составляется для всех

узлов, в число неизвестных входят и реакции опор. Коэффициентами матрицы системы уравнений являются направляющие косинусы неизвестных усилий, вычисляемые по координатам узлов и структуре соединений стержней [17].

Расчет спектра частот

Принято, что массы движутся вертикально. В этом случае число степеней свободы системы масс в узлах равно числу подвижных узлов $K = 4n + 2$ (опорные узлы приняты неподвижными). Система уравнений движения масс в узлах:

$$\mathbf{J}_K \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{D}_K \mathbf{U} = 0, \quad (1)$$

где $\mathbf{J}_K = m\mathbf{I}_K$ — матрица инерции, имеющая диагональный вид в случае одинаковых масс; $\mathbf{I}_K$ — единичная матрица; $\ddot{\mathbf{U}}$ — вектор ускорений; $\mathbf{D}_K$ — матрица жесткости решетки; $\mathbf{U} = [y_1, y_2, \dots, y_K]$ — вектор смещений масс.

Если умножить равенство (1) на матрицу податливости $\mathbf{B}_K$, обратную к $\mathbf{D}_K$, то с учетом соотношения $\ddot{\mathbf{U}} = -\omega^2 \mathbf{U}$, справедливого для колебаний вида $y_k = u_k \sin(\omega t + \varphi_0)$, задачу можно свести к проблеме собственных значений матрицы $\mathbf{B}_K$: $\mathbf{B}_K \mathbf{U} = \lambda \mathbf{U}$, где $\lambda = 1 / (m\omega^2)$ — собственное значение матрицы $\mathbf{B}_K$; ω — собственная частота колебаний. Элементы матрицы $\mathbf{B}_K$ вычисляются с помощью интеграла Мора:

$$b_{i,j} = \sum_{p=1}^N S_p^{(i)} S_p^{(j)} l_p / (EF),$$

где $S_p^{(i)}$ — усилие в стержне p от действия единичной силы, приложенной к узлу i ; l_p — длина стержня p ; E — модуль упругости; F — площадь поперечного сечения стержней.

Пробный расчет усилий в стержнях показывает, что независимо от нагрузки при числе панелей, кратном трем, определитель матрицы системы уравнений равновесия вырождается. Известно, что это связано с кинематическим вырождением конструкции. Для подтверждения этой особенности в данном случае можно найти картину распределения возможных скоростей узлов, например, при $n = 3$.

Основой кинематического алгоритма являются уравнения, связывающие компоненты скоростей трех точек двухзвенника (рис. 2):

$$v_{xj} = v_{xi} - (y_j - y_i)\omega_1, \quad v_{yj} = v_{yi} + (x_j - x_i)\omega_1,$$

$$v_{xk} = v_{xi} - (y_k - y_i)\omega_2, \quad v_{yk} = v_{yi} + (x_k - x_i)\omega_2.$$

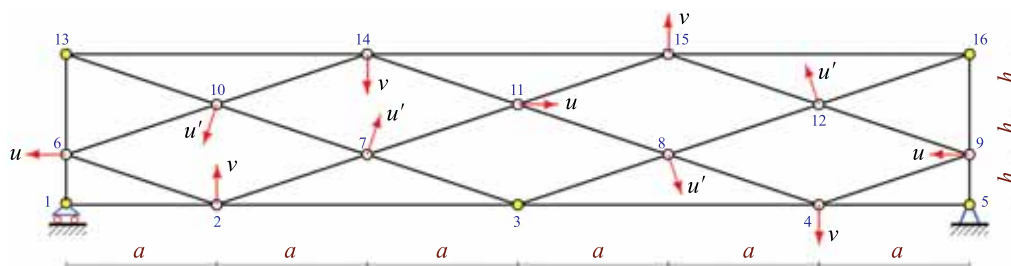


Рис. 3. Схема распределения возможных скоростей изменяемой фермы, $n = 3$

Fig. 3. Scheme of distribution of possible velocities of a variable truss, $n = 3$

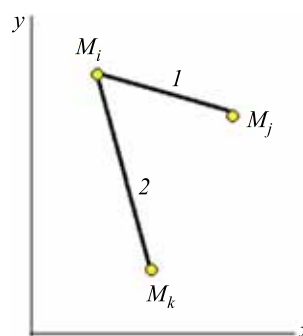


Рис. 2. Схема двухзвенника для определения виртуальных скоростей узлов изменяемой фермы

Fig. 2. Two-link scheme for determining the virtual velocities of a variable truss nodes

В системе уравнений заданы координаты узлов и компоненты скоростей точек M_j , M_k , неизвестные — компоненты скорости точки M_i . Алгоритм можно представить блок-схемой: $[k, j] \rightarrow [i, v_{xi}, v_{yi}]$. В сокращенной форме: $[k, j] \rightarrow i$. Применительно к рассматриваемой ферме при $n = 3$ необходимо сначала задать угловую скорость произвольного звена, например звена 4–5, и вычислить компоненты скорости узла 4:

$$v_{x4} = -(y_4 - y_5)\omega = 0,$$

$$v_{y4} = (x_4 - x_5)\omega = -a\omega,$$

где ω — угловая скорость звена 4–5. Скорость шарнира 5 равна нулю. Таким образом, образуется двухзвенник 4–5–9, для которого запишем блок-схему $[4, 5] \rightarrow 9$, откуда следует $[4, 5] \rightarrow [9, -h\omega, -0]$. Чтобы найти скорость очередного узла, например узла 12, необходимо временно задать горизонтальную скорость $v_{x,16}$ какой-то неизвестной величиной $v_{x,16} = V$ (вертикальная компонента, очевидно, равна нулю) и получить: $[9, 16] \rightarrow [12, \omega(V-h)/2, a\omega(V+h)/(2h)]$. Далее имеем следующую цепочку вычислений: $[4, 12] \rightarrow 8$, $[16, 12] \rightarrow 15$, $[15, 8] \rightarrow 11$, $[4, 8] \rightarrow 3$, $[11, 3] \rightarrow 7$, $[11, 15] \rightarrow 14$, $[14, 7] \rightarrow 10$, $[14, 10] \rightarrow 13$. Из последней схемы следует: $[14, 10] \rightarrow [13, V, 2aV/h]$. Из условия $v_{y,13} = 2aV/h = 0$ получаем значение ранее введенного неизвестного параметра $V = 0$.

Таким образом, распределение скоростей имеет вид (рис. 3):

$$\begin{aligned}v_1 = v_3 = v_5 = v_{13} = v_{16} &= 0, \\ \bar{v}_2 = \bar{v}_{15} &= [0, a\omega], \bar{v}_4 = \bar{v}_{14} = [0, -a\omega], \\ \bar{v}_6 = \bar{v}_9 &= [-h\omega, 0], \bar{v}_7 = [h\omega/2, a\omega/2], \\ \bar{v}_8 &= [h\omega/2, -a\omega/2], \bar{v}_{10} = [-h\omega/2, -a\omega/2], \\ \bar{v}_{11} &= [h\omega, 0], \bar{v}_{12} = [-h\omega/2, a\omega/2].\end{aligned}$$

Дальнейший расчет будет произведен при допустимых значениях числа панелей: $n = (6k - (-1)^k - 3)/4$, $k = 1, 2, \dots$. Эта функция не принимает значения, кратные трем.

Аналитическая оценка первой частоты

Для расчета нижней оценки первой частоты собственных колебаний систем с многими степенями свободы известна формула Донкерлея [18–20]:

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

где ω_i — парциальная частота колебаний массы m , расположенной в узле i . В случае колебаний одной массы уравнение колебаний (1) имеет вид: $m\ddot{y}_i + d_i y_i = 0$, где d_i — коэффициент жесткости узла фермы при воздействии на него вертикальной силы. Отсюда парциальная частота имеет вид: $\omega_i = \sqrt{d_i/m}$. Коэффициент жесткости вычисляется с помощью интеграла Мора через коэффициент податливости:

$\delta_i = 1/d_i = \sum_{j=1}^N (S_j^{(i)})^2 l_j / (EF)$. Обозначено: $S_j^{(i)}$ — усилие в стержне с номером j от действия единичной силы, приложенной к узлу i . Из выражения (2) следует:

$$\omega_D^{-2} = m \sum_{j=1}^K \delta_j = m \Delta_k. \quad (3)$$

Этот подход не требует решения частотного уравнения, порядок которого равен числу степеней свободы системы, именно поэтому здесь возможен аналитический метод решения.

Последовательно рассчитывая суммы Δk для различных k , получаем:

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= \frac{a^3 + 2c^3 + 11h^2}{h^2 EF}, \\ \Delta_2 &= \frac{18a^3 + 20c^3 + 33h^2}{2h^2 EF}, \\ \Delta_3 &= \frac{196a^3 + 168c^3 + 117h^2}{4h^2 EF}, \\ \Delta_4 &= \frac{493a^3 + 330c^3 + 175h^2}{5h^2 EF}, \\ \Delta_5 &= \frac{1967a^3 + 910c^3 + 335h^2}{7h^2 EF}, \dots\end{aligned}$$

В общем случае решение имеет вид:

$$\Delta k = (C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 h^3) / (h^2 EF). \quad (4)$$

Найти общие члены последовательностей коэффициентов можно с помощью операторов `gfg`, `findrecur` и `rsolve` системы Maple. В результате обобщения десяти решений найдем:

$$C_1 = (12k^4 - 8(-1)^k + 3)k^3 + 3(4(-1)^k + 50)k^2 - 2(17(-1)^k + 69)k + 15(-1)^k + 15/30,$$

$$C_2 = 6k^2 - 2((-1)^k + 3)k + (-1)^k + 1,$$

$$C_3 = (28k^2 - 2(5(-1)^k + 8)k + 3(-1)^k + 3)/(2n).$$

В итоге из формул (2)–(4) получаем оценку первой частоты колебаний решетки:

$$\omega_D = h \sqrt{\frac{EF}{m(C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 h^3)}}. \quad (5)$$

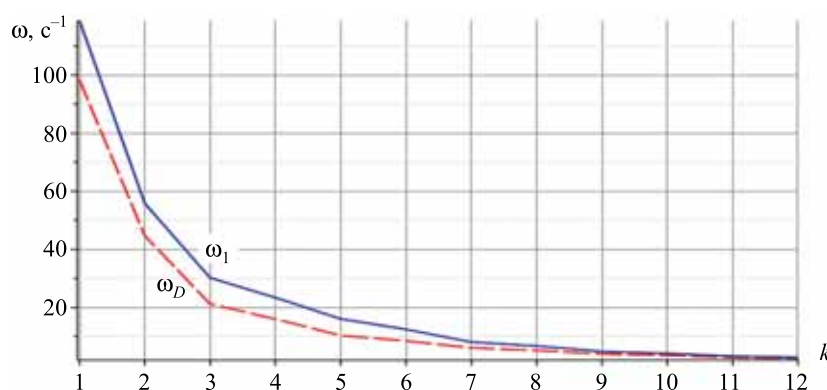


Рис. 4. Зависимость первой частоты собственных колебаний фермы от числа панелей. Сравнение аналитической оценки ω_D и численного расчета ω_1

Fig. 4. Dependence of the first natural oscillation frequency of the truss on the number of panels. Comparison of analytical evaluation ω_D and numerical calculation ω_1

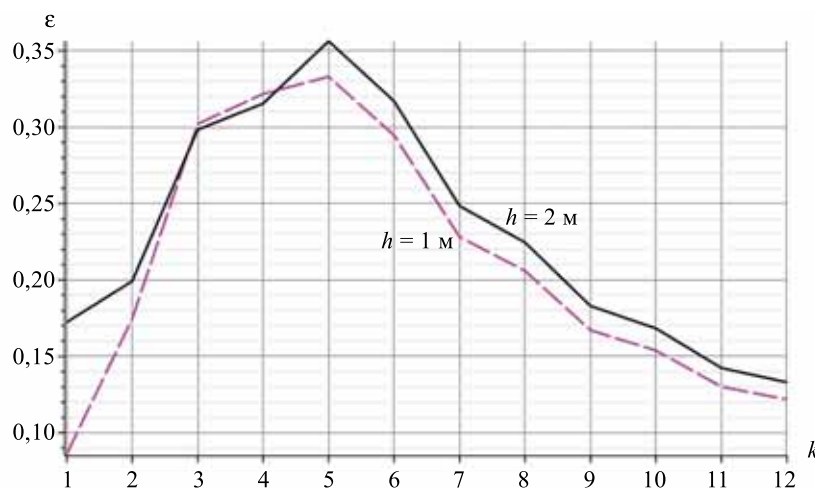


Рис. 5. Зависимость погрешности аналитической оценки от числа панелей

Fig. 5. Dependence of analytical estimation error on the number of panels

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнение полученной аналитической оценки первой частоты с численным решением задачи о минимальной частоте спектра системы с K степенями свободы представлено кривыми на графике (рис. 4). Численное решение задачи о спектре сводится к нахождению собственных чисел матрицы податливости решетки, элементы которой также вычисляются через интеграл Мора. В решении использовался оператор Eigenvalues специализированного пакета Linear-Algebra системы Maple. Кривые зависимости первой частоты ω_1 и оценки ω_D (4) от числа панелей построены при $m = 400$ кг, $a = 4$ м, $h = 2$ м, $EF = 0,32 \times 10^6$ кН. Зависимость величины относительной погрешности $\varepsilon = (\omega_1 - \omega_D)/\omega_1$ от числа панелей (рис. 5) показывает, что с увеличением числа панелей относительная погрешность аналитического решения сначала резко растет, а затем монотонно падает с 34 до 12 %. Погрешность незначительно зависит от высоты решетки. Для больших чисел панелей ($k > 4$) погрешность больше для высоких решеток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Построена математическая модель плоской статически определимой решетки, позволяющая получить аналитическую оценку на первую, наиболее важную, частоту спектра собственных колебаний.

По сравнению с подобными решетками, для которых находились аналитические решения, в рассмотренной решетке стержни пересекаются только в шарнирах, что существенно увеличивает число степеней свободы системы. Сравнение результата с численным решением показывает хорошую точность полученной формулы. При этом погрешность падает с увеличением числа панелей. Это особенно важно при расчете конструкций с большим числом степеней свободы, для которых характерен обратный эффект: за счет накопления ошибок округления погрешность численных решений растет именно в системах с большим числом панелей. Все аналитические преобразования и вычисления выполнены в системе Maple, но предпочтение этой математической среде дано не из каких-либо ее особенных достоинств, это просто выбор автора. С неменьшим успехом при выводе формул для решения подобных задач могут быть использованы такие пакеты, как Wolfram Mathematica, Maxima, Sage, Derive.

Предложенный алгоритм может быть использован для вывода аналитических оценок частот других подобных регулярных стержневых систем. Некоторой альтернативой методу нижней оценки Донкерлея является энергетический метод Рэля оценки сверху, для которого также можно найти аналитическое решение [18]. Это решение получается более точным, но по форме значительно более громоздким.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rafezy B., Howson W.P. Vibration analysis of doubly asymmetric, three-dimensional structures comprising wall and frame assemblies with variable cross-section // Journal of Sound and Vibration. 2008. Vol. 318. Issue 1–2. Pp. 247–266. DOI: 10.1016/J.JSV.2008.04.018
2. Pollino M., Bruneau M. Dynamic seismic response of controlled rocking bridge steel-truss piers // Engineering Structures. 2008. Vol. 30. Issue 6. Pp. 1667–1676. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2007.10.016
3. Siriguleng B., Zhang W., Liu T., Liu Y.Z. Vibration modal experiments and modal interactions

of a large space deployable antenna with carbon fiber material and ring-truss structure // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 207. P. 109932. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.109932

4. Воробьев О.В. О методах получения аналитического решения для проблемы собственных частот шарнирных конструкций // *Строительная механика и конструкции*. 2020. № 1 (24). С. 25–38.

5. Petrenko V.F. The natural frequency of a two-span truss // *AlfaBuild*. 2021. № 5 (20). P. 2001. DOI: 10.57728/ALF.20.1

6. Петриченко Е.А. Нижняя граница частоты собственных колебаний фермы финка // *Строительная механика и конструкции*. 2020. № 3 (26). С. 21–29.

7. Kirsanov M. Model of a spatial dome cover. Deformations and oscillation frequency // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. № 1 (99). P. 9904. DOI: 10.4123/CUBS.99.4

8. Kirsanov M. Planar Trusses: Schemes and Formulas. Cambridge Scholars Publishing Lady Stephenson Library, Newcastle upon Tyne, NE6 2PA, UK, 2019. 206 p.

9. Dai Q. Analytical Dependence of Planar Truss Deformations on the Number of Panels // *AlfaBuild*. 2021. № 2 (17). P. 1701. DOI: 10.34910/ALF.17.1

10. Ilyushin A.S. The formula for calculating the deflection of a compound externally statically indeterminate frame // *Structural Mechanics and Structures*. 2019. № 3 (22). Pp. 29–38.

11. Белянкин Н.А., Бойко А.Ю. Формулы для прогиба балочной фермы с произвольным числом панелей при равномерном нагружении // *Строительная механика и конструкции*. 2019. № 1 (20). Pp. 21–29.

12. Ovsyannikova V.M. Dependence of deformations of a trapezous truss beam on the number of panels // *Structural Mechanics and Structures*. 2020. № 3 (26). Pp. 13–20.

13. Goloskokov D.P., Matrosov A.V. Approximate analytical approach in analyzing an orthotropic rectangular plate with a crack // *Materials Physics and Mechanics*. 2018. Vol. 36. Issue 1. Pp. 137–141. DOI: 10.18720/MPM.3612018_15

14. Goloskokov D.P., Matrosov A.V. Approximate analytical solutions in the analysis of thin elastic plates // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 1959. Issue 1. P. 070012. DOI: 10.1063/1.5034687

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

16. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids — the hunt for statically determinate periodic trusses // *ZAMM*. 2005. Vol. 85. Issue 9. Pp. 607–617. DOI: 10.1002/zamm.200410208

17. Бука-Вайваде К., Кирсанов М.Н., Сердюк Д.О. Calculation of deformations of a cantilever-frame planar truss model with an arbitrary number of panels // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 4. С. 510–517. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517

18. Vorobev O.V. Bilateral Analytical Estimation of the First Frequency of a Plane Truss // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020. Vol. 92. Pp. 9204–9204. DOI: 10.18720/CUBS.92.4

19. Levy C. An iterative technique based on the Dunkerley method for determining the natural frequencies of vibrating systems // *Journal of Sound and Vibration*. 1991. Vol. 150. Issue 1. Pp. 111–118. DOI: 10.1016/0022-460X(91)90405-9

20. Low K.H. A modified Dunkerley formula for eigenfrequencies of beams carrying concentrated masses // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2000. Vol. 42. Issue 7. Pp. 1287–1305. DOI: 10.1016/S0020-7403(99)00049-1

Поступила в редакцию 23 мая 2022 г.

Принята в доработанном виде 25 мая 2022 г.

Одобрена для публикации 12 октября 2022 г.

ОБ АВТОРЕ: **Михаил Николаевич Кирсанов** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин, **Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»);** 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; SPIN-код: 8679-6853, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, Google Scholar: FfoNGFwAAAAJ, IstinaresearcherID: 2939132; c216@ya.ru.

REFERENCES

1. Rafezy B., Howson W.P. Vibration analysis of doubly asymmetric, three-dimensional structures comprising wall and frame assemblies with variable cross-section. *Journal of Sound and Vibration*. 2008; 318(1-2): 247-266. DOI: 10.1016/J.JSV.2008.04.018

2. Pollino M., Bruneau M. Dynamic seismic response of controlled rocking bridge steel-truss piers.

Engineering Structures. 2008; 30(6):1667-1676. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2007.10.016

3. Siriguleng B., Zhang W., Liu T., Liu Y.Z. Vibration modal experiments and modal interactions of a large space deployable antenna with carbon fiber material and ring-truss structure. *Engineering Structures*. 2020; 207:109932. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.109932

4. Vorobev O.V. About methods of obtaining analytical solution for eigenfrequencies problem of trusses. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 1(24):25-38. (rus.).
5. Petrenko V.F. The natural frequency of a two-span truss. *AlfaBuild*. 2021; 5(20):2001. DOI: 10.57728/ALF.20.1
6. Petrichenko E.A. Lower bound of the natural oscillation frequency of the fink truss. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 3(26):21-29. (rus.).
7. Kirsanov M. Model of a spatial dome cover. Deformations and oscillation frequency. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022; 1(99):9904. DOI: 10.4123/CUBS.99.4
8. Kirsanov M. *Planar Trusses: Schemes and Formulas*. Cambridge Scholars Publishing Lady Stephenson Library, Newcastle upon Tyne, NE6 2PA, UK, 2019; 206.
9. Dai Q. Analytical Dependence of Planar Truss Deformations on the Number of Panels. *AlfaBuild*. 2021; 2(17):1701. DOI: 10.34910/ALF.17.1
10. Ilyushin A.S. The formula for calculating the deflection of a compound externally statically indeterminate frame. *Structural Mechanics and Structures*. 2019; 3(22):29-38.
11. Belyankin N.A., Boyko A.Y. Formula for deflection of a girder with an arbitrary number of panels under the uniform load. *Structural Mechanics and Structures*. 2019; 1(20):21-29. (rus.).
12. Ovsyannikova V.M. Dependence of deformations of a trapezous truss beam on the number of panels. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 3(26):13-20.
13. Goloskokov D.P., Matrosov A.V. Approximate analytical approach in analyzing an orthotropic rectangular plate with a crack. *Materials Physics and Mechanics*. 2018; 36(1):137-141. DOI: 10.18720/MPM.3612018_15
14. Goloskokov D.P., Matrosov A.V. Approximate analytical solutions in the analysis of thin elastic plates. *AIP Conference Proceedings*. 2018; 1959(1):070012. DOI: 10.1063/1.5034687
15. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2006; 54(4):756-782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008
16. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids — the hunt for statically determinate periodic trusses. *ZAMM*. 2005; 85(9):607-617. DOI: 10.1002/zamm.200410208
17. Buka-Vaivade K., Kirsanov M.N., Serdjuk D.O. Calculation of deformations of a cantilever-frame planar truss model with an arbitrary number of panels. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(4):510-517. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517
18. Vorobev O.V. Bilateral Analytical Estimation of the First Frequency of a Plane Truss. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020; 92:9204-9204. DOI: 10.18720/CUBS.92.4
19. Levy C. An iterative technique based on the Dunkerley method for determining the natural frequencies of vibrating systems. *Journal of Sound and Vibration*. 1991; 150(1):111-118. DOI: 10.1016/0022-460X(91)90405-9
20. Low K.H. A modified Dunkerley formula for eigenfrequencies of beams carrying concentrated masses. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2000; 42(7):1287-1305. DOI: 10.1016/S0020-7403(99)00049-1

Received May 23, 2022.

Adopted in revised form on May 25, 2022.

Approved for publication on October 12, 2022.

B I O N O T E S : **Mikhail N. Kirsanov** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; SPIN-code: 8679-6853, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, Google Scholar: FfoNGFWAAAAJ, IstinaresearcherID: 2939132; c216@ya.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 519.2:624.07

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1331-1346

Определение коэффициентов надежности по ответственности для отдельных несущих элементов на основе вероятностного анализа

Олег Вартанович Мкртычев¹, Олег Сергеевич Щедрин²,
Екатерина Михайловна Лохова¹

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

² Главгосэкспертиза России; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлен метод определения частных коэффициентов ответственности по надежности для отдельных несущих элементов на основе вероятностного анализа. Проводится оценка надежности многоэтажного железобетонного здания с конструктивной схемой в виде безригельного связевого каркаса. Приведена разработанная методика и соответствующие результаты выявления значений коэффициентов надежности по ответственности для отдельных несущих элементов на основе решения вероятностной задачи с использованием критерия равного риска.

Материалы и методы. Объект исследования представляет собой двенадцатиэтажное каркасное здание прямоугольной формы в плане. Исследование производится вероятностным методом статистических испытаний, который позволяет дать оценку вероятности наступления отказа строительных конструкций. За отказ принято превышение расчетным армированием проектного армирования. В качестве случайных величин принимаются: прочность арматуры $R_{арм}$, прочность бетона $R_{бет}$, а также величина временной равномерно распределенной нагрузки на перекрытия F . Все рассматриваемые случайные величины приняты распределенными по нормальному закону.

Результаты. Результаты исследования представлены для угловой, крайней, средней и центральной колонн первого этажа. Приведены гистограммы расчетной площади армирования и плотность распределения площади армирования для каждой из колонн, а также таблицы полученных значений вероятности отказа, риска и поправочных коэффициентов к коэффициенту надежности по ответственности для рассматриваемых колонн.

Выводы. Полученные поправочные коэффициенты могут быть применены для дифференцирования коэффициента надежности по ответственности γ_n для отдельных несущих элементов. Предложенный подход позволяет оптимизировать конструктивные решения железобетонных зданий по расходу материалов с обеспечением необходимого уровня надежности и механической безопасности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теория надежности, метод предельных состояний, аварийная расчетная ситуация, вероятностный подход, метод статистических испытаний, риск, коэффициент надежности по ответственности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мкртычев О.В., Щедрин О.С., Лохова Е.М. Определение коэффициентов надежности по ответственности для отдельных несущих элементов на основе вероятностного анализа // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 10. С. 1331–1346. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1331-1346

Автор, ответственный за переписку: Екатерина Михайловна Лохова, elm97@mail.ru.

Determination of individual coefficients on the basis of probabilistic analysis

Oleg V. Mkrtychev¹, Oleg S. Shchedrin², Ekaterina M. Lokhova¹

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

² Glavgosexpertiza of Russia; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This article presents a method for determining partial liability factors for reliability for individual load-bearing elements based on a probable analysis. An assessment is made of the reliability of a multi-storey reinforced concrete building with a structural scheme in the form of a beamless braced frame.

Materials and methods. The study is carried out by the probabilistic method of statistical tests. The excess of the design reinforcement of the design design reinforcement is taken as a failure. As random variables, the following are accepted: reinforcement strength R_{arm} , concrete strength R_{bet} , as well as the value of the temporary uniformly distributed load on the floors F . All considered random variables are assumed to be distributed according to the normal law.

Results. The results of the study are presented for the corner column, the outer column, the middle column and the central column of the first floor. The results are histograms of the calculated reinforcement area and the distribution density of the reinforcement area for each of the columns, as well as tables of the obtained values of the probability of failure, risk and correction factors to the reliability coefficient on responsibility for the columns in question.

Conclusions. The obtained correction factors can be applied to refine the reliability factor for liability γ_n . The proposed approach makes it possible to optimize the design solutions for reinforced concrete buildings in terms of material consumption while ensuring the required level of reliability and mechanical safety.

KEYWORDS: reliability theory, limit state method, emergency design situation, probabilistic approach, statistical test method, risk, liability safety factor

FOR CITATION: Mkrtychev O.V., Shchedrin O.S., Lokhova E.M. Determination of individual coefficients on the basis of probabilistic analysis. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(10):1331-1346. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1331-1346 (rus.).

Corresponding author: Ekaterina M. Lokhova, elm97@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Метод предельных состояний, разработанный в нашей стране, основан на исследованиях, выполненных под руководством профессора Н.С. Стрелецкого. Этот метод введен в строительные нормы и правила в 1955 г., в настоящее время в Российской Федерации он является основным методом, используемым при расчете и проектировании строительных конструкций. Метод предельных состояний позволяет достаточно обоснованно производить проектирование конструкций благодаря учету:

- вероятностных свойств действующих на конструкции нагрузок;
- вероятностных свойств прочности материалов и несущих элементов;
- особенностей работы отдельных видов конструкций;
- уровня ответственности конструкций зданий и сооружений.

Расчет конструкции по методу предельных состояний должен гарантировать ненаступление предельного состояния [1].

Расчет по предельным состояниям завоевал широкое признание во всем мире и положен в основу стандарта ИСО-2394 и системы Еврокодов, где получил название «метод частных коэффициентов надежности».

Метод предельных состояний позволяет обеспечить необходимый уровень надежности зданий и сооружений, что подтверждается опытом проектирования, строительства и эксплуатации. Однако данный метод имеет ряд недостатков, например, невозможно сказать, какой уровень надежности в количественном измерении формируется в результате применения норм проектирования, одинаков ли этот уровень надежности для зданий и сооружений различных конструктивных схем и выполненных из различных материалов.

Существующие методы проектирования не дают возможность проектировать их с заданным уровнем надежности. Основным надежностным требованием этих методов является сравнение расчетных значений нагрузочного эффекта и несущей способности. Но предельное состояние не может определяться лишь сопоставлением этих расчетных значений. Оно

может наступить при значениях нагрузок меньше расчетных, если реализовано соответственно меньшее значение несущей способности [2–4].

В связи с этим при нормировании надежностных требований нельзя ограничиться так называемым полувероятностным подходом, как иногда трактуется метод предельных состояний, т.е. применять методы теории вероятностей и математической статистики при нормировании исходных параметров, рассматривая их в качестве случайных, и далее не решать напрямую вероятностную задачу теории надежности строительных конструкций.

В статье представлена разработанная методика и соответствующие результаты определения значений коэффициентов надежности по ответственности для отдельных несущих элементов на основе решения вероятностной задачи с использованием критерия равного риска [5, 6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постановка задачи

В исследовании производится оценка надежности многоэтажного железобетонного здания с конструктивной схемой в виде безригельного связевого каркаса [7–10].

Объект исследования представляет собой двенадцатиэтажное каркасное здание прямоугольной формы в плане (рис. 1, 2) с размерами $24,0 \times 36,0$ м (в осях А-Д/1-7), отметка верха строительных конструкций +43,200, сетка колонн $6,0 \times 6,0$ м, высота этажа 3,6 м. Узлы сопряжения колонн, перекрытий и покрытия — жесткие.

Колонны приняты сечением 400×400 мм (бетон В25, продольная арматура класса А500С, поперечная арматура А240), толщина перекрытий и покрытия 200 мм (бетон В25, продольная арматура класса А500С, поперечная арматура А240).

Конечно-элементная модель здания в ПК ЛИРА-САПР приведена на рис. 3. Колонны смоделированы с использованием стержневых конечных элементов (КЭ), а плиты перекрытий и покрытия — с применением пространственных КЭ оболочки размером $0,5 \times 0,5$ м [11–15].

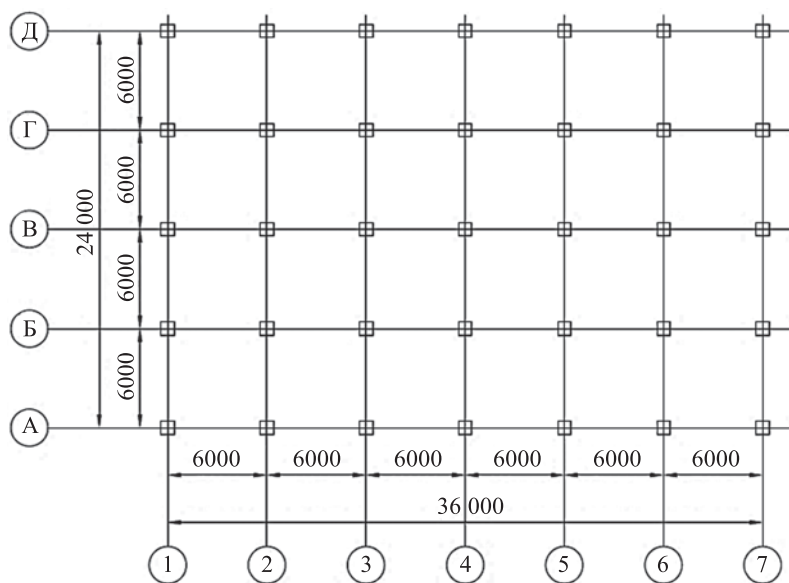


Рис. 1. План типового этажа здания

Fig. 1. Typical building floor plan

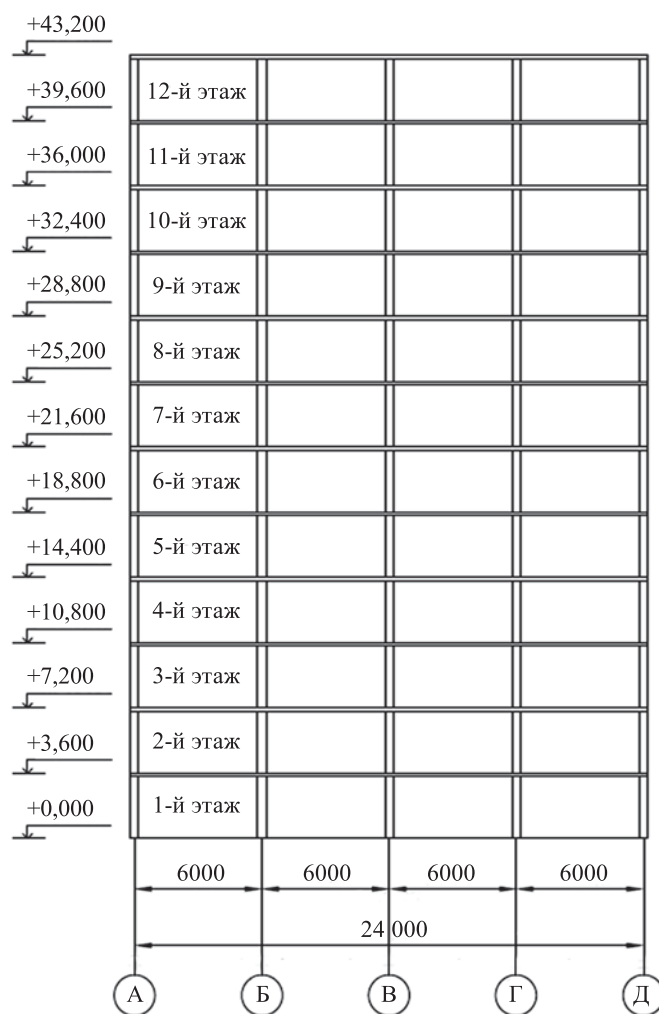


Рис. 2. Разрез 1-1

Fig. 2. Section 1-1

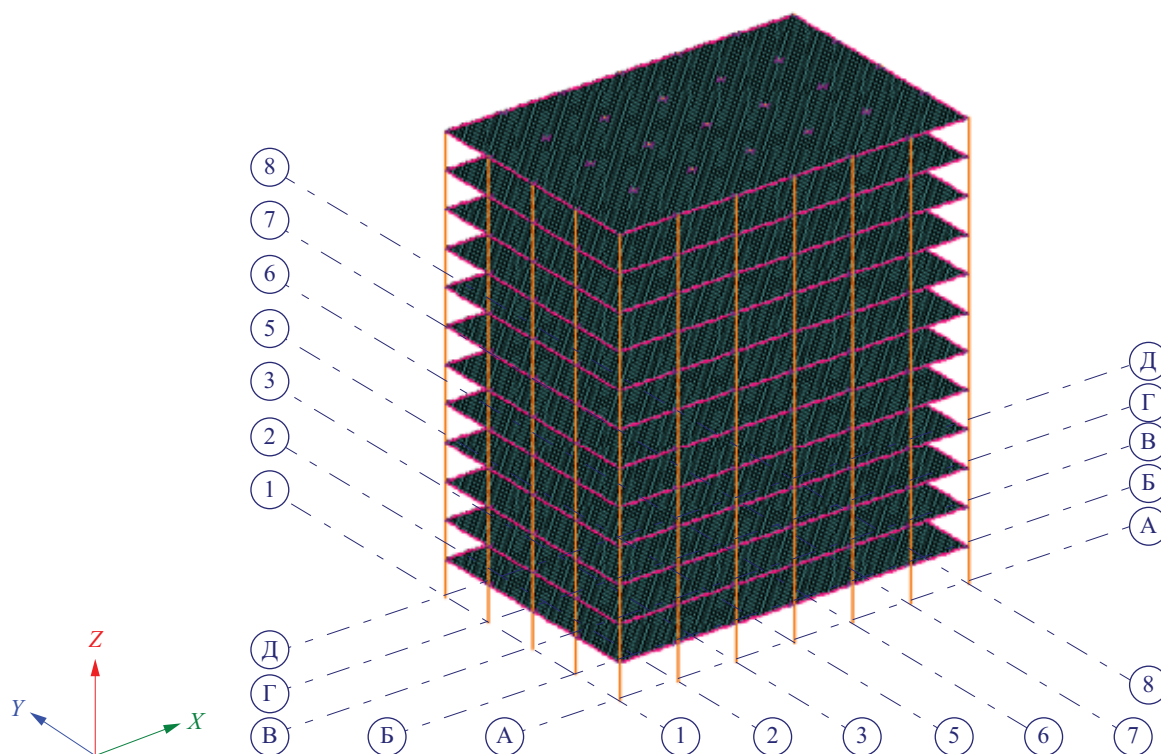


Рис. 3. Конечнo-элементная модель здания

Fig. 3. Course-elemental building model

Методы исследования

Общие положения теории надежности

Надежность является качественной характеристикой, имеющей количественные показатели. Наиболее важным количественным показателем служит вероятность отказа P_f [16, 17].

В общем случае вероятность отказа конструкции P_f при исходных параметрах, представленных случайными величинами, равна многомерному интегралу:

$$P_f = P_{rob} \{g(x_1, x_2, \dots, x_n) < 0\} = \int_{\Omega_n} \dots \int f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n, \quad (1)$$

где Ω_n — область отказов состояний в n -мерном пространстве всех случайных величин $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, граница которой определяется условием $g = 0$; $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — совместная плотность вероятности всех случайных величин.

Если все расчетные величины можно разделить на две группы, где первая включает характеристики, относящиеся к свойствам самой конструкции, а вторая характеризует внешние воздействия, то в приложении к задачам расчета на прочность условие отказа математически будет выражаться неравенством:

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = R(x_1, x_2, \dots, x_m) - Q(x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n) < 0 \quad (2)$$

или

$$g = R - Q < 0, \quad (3)$$

где g — функция работоспособности (резерв прочности); R — несущая способность; Q — нагрузочный эффект.

При любых законах распределения R и Q математическое ожидание и стандартное отклонение резерва прочности соответственно равны:

$$m_g = m_R - m_Q; \quad (4)$$

$$s_g = \sqrt{s_R^2 + s_Q^2}, \quad (5)$$

где m_R и s_R — математическое ожидание и стандарт распределения несущей способности; m_Q и s_Q — математическое ожидание и стандарт распределения нагрузочного эффекта.

Решение интеграла (2) возможно различными методами. При этом наиболее используемыми являются методы: двух моментов, статистической линеаризации, горячих точек и статистических испытаний.

При решении поставленной задачи об определении значений коэффициентов надежности по ответственности для отдельных несущих элементов воспользуемся методом статистических испытаний.

Метод статистических испытаний

Метод статистических испытаний позволяет дать оценку вероятности наступления отказа строительных конструкций. В методе производится доста-

точно большое число m статистических испытаний по схеме Бернулли, после чего определяется частота появления отказов v . Частота отказов представляет собой отношение числа отказов k к общему числу испытаний и рассматривается как оценка вероятности отказа P_f :

$$v = \frac{k}{m} \approx P_f. \quad (6)$$

За отказ принято превышение расчетным армированием проектного армирования. В качестве случайных величин рассматриваются: прочность арматуры $R_{арм}$, прочность бетона $R_{бет}$, а также временная равномерно распределенная нагрузка на перекрытие F . Все рассматриваемые случайные величины приняты распределенными по нормальному закону.

Прочность бетона $R_{бет}$

В нормах проектирования для бетона установлена обеспеченность 0,95. Переход от кубиковой

прочности бетона R к призмной R_b осуществляется с помощью формул:

$$R_b = \varphi R; \quad (7)$$

$$\varphi = 0,77 - 0,001R. \quad (8)$$

Коэффициент вариации прочности бетона v принят равным 0,135.

Если прочность распределена по нормальному закону, а ее нормативное значение имеет обеспеченность 0,95, то справедливы следующие соотношения:

$$m_R^H = \frac{R^H}{1 - 1,64v_R} = 23,76 \text{ МПа}; \quad (9)$$

$$s_R = m_R v_R = 3,2 \text{ МПа}. \quad (10)$$

Функция плотности распределения прочности $R_{бет}$ приведена на рис. 4.

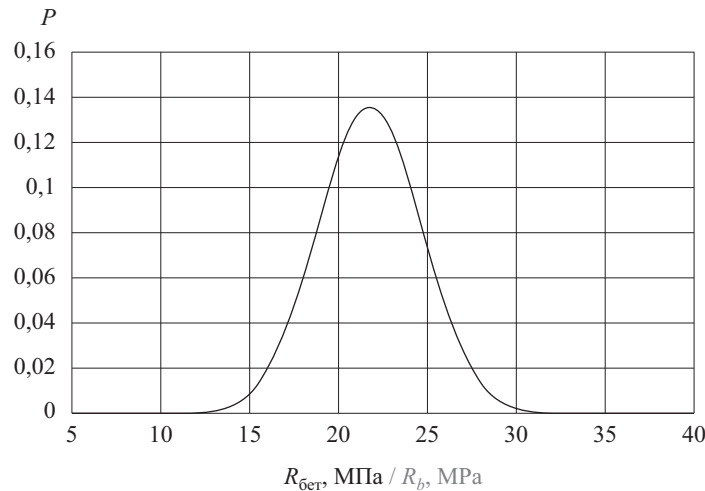


Рис. 4. Функция плотности распределения $R_{бет}$ ($m_R^H = 23,76$ МПа; $s_R = 3,2$ МПа)

Fig 4. Distribution density function R_b ($m_R^H = 23.76$ МПа; $s_R = 3.2$ МПа)

Прочность арматуры $R_{арм}$

Коэффициент вариации прочности арматуры принят равным 0,1, тогда основные характеристики в предположении нормального распределения прочности:

$$m_R^H = \frac{R^H}{1 - 1,64v_R} = 598,09 \text{ МПа}; \quad (11)$$

$$s_R = m_R v_R = 59,8 \text{ МПа}, \quad (12)$$

где m_R — математическое ожидание случайной величины; R^H — нормативное значение сопротивления материала.

Функция плотности распределения прочности $R_{арм}$ показана на рис. 5.

Равномерно распределенная нагрузка на перекрытие F

Нормативное значение нагрузки $F_n = 2$ кН. Будем исходить из того, что нагрузка имеет нормальный закон распределения, а обеспеченность указанного нормативного значения 0,95 и коэффициент вариации v_F равен 0,4 [18–20]. Тогда основные вероятностные характеристики нагрузки:

$$m_F^H = 1,599 \text{ кН}; \quad (13)$$

$$s_F = m_F v_F = 0,634 \text{ кН}. \quad (14)$$

Функция плотности распределения нагрузки представлена на рис. 6.

Ниже приведены результаты исследования для угловой колонны № 1, крайней колонны № 2, средней колонны № 13 и центральной колонны № 18 первого этажа (см. рис. 7).

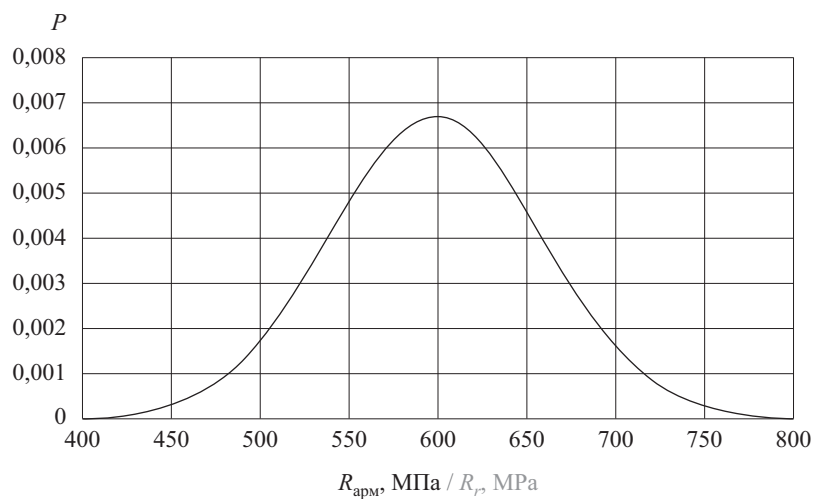


Рис. 5. Функция плотности распределения $R_{арм}$ ($m_R^H = 598,09$ МПа; $s_R = 59,8$ МПа)

Fig. 5. Distribution density function R_r ($m_R^H = 598.09$ МПа; $s_R = 59.8$ МПа)

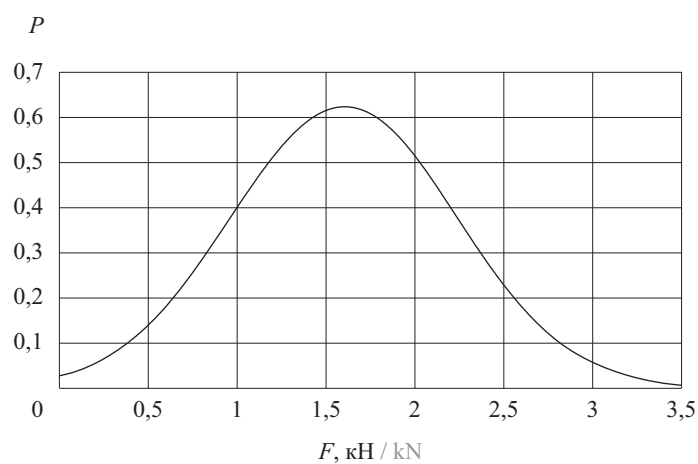


Рис. 6. Функция плотности распределения F ($m_F^H = 1,599$ кН; $s_F = 0,634$ кН)

Fig. 6. Distribution density function F ($m_F^H = 1.599$ кН; $s_F = 0.634$ кН)

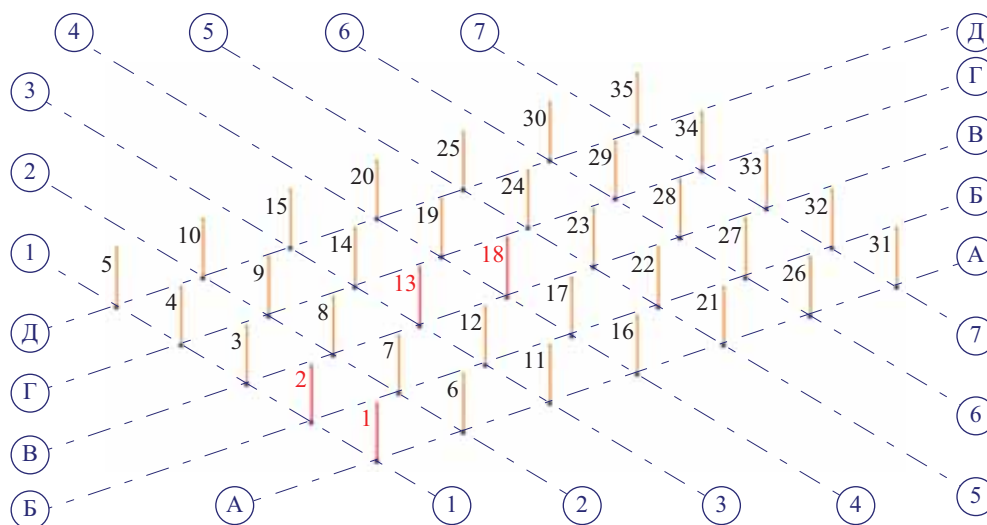


Рис. 7. Схема расположения колонн

Fig. 7. Column layout

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 1, 2 представлена реализация исходных случайных величин, а также соответствующие, полученные методом статистических испытаний, расчетные площади армирования для каждой из рассматриваемых колонн.

Полученные эмпирические распределения площади армирования для каждой из колонн были аппроксимированы нормальным законом распределения. На рис. 8–13 приведены гистограммы расчетной площади армирования и плотности распределения нормального закона с соответствующими параметрами.

Табл. 1. Значения расчетной площади армирования (симметричное армирование)

Table 1. Reinforcement area values (symmetrical reinforcement)

Номер случая Case Number	F , кг kg	$R_{бет}$, МПа R_b , MPa	$R_{арм}$, МПа R_s , MPa	Площадь армирования S , см ² Reinforcement area S , cm ²			
				Угловая колонна Corner column	Крайняя колонна Outermost column	Средняя колонна Middle column	Центральная колонна Central column
1	240,00	435,00	14,50	19,5	65,0	134,0	133,0
2	246,65	528,36	14,27	18,7	59,1	117,0	116,0
3	257,67	456,87	11,95	29,0	74,3	141,0	141,0
4	213,91	582,02	19,26	3,8	41,2	95,2	95,1
5	103,87	527,21	15,81	10,2	46,9	98,5	98,3
6	283,22	465,74	17,75	10,6	56,2	124,0	124,0
7	283,08	516,71	17,54	10,9	53,3	114,0	114,0
8	188,95	447,54	17,05	10,2	54,1	120,0	119,0
9	216,95	496,80	14,70	16,9	59,2	119,0	119,0
10	205,24	495,37	14,83	16,7	58,2	118,0	117,0
11	177,51	497,78	16,14	11,8	52,4	111,0	111,0
12	247,53	481,95	14,28	20,1	63,5	127,0	126,0
13	146,70	552,28	14,58	14,5	51,8	103,0	103,0
14	273,69	404,49	20,38	3,2	53,0	130,0	129,0
15	181,37	519,09	17,13	8,6	48,2	104,0	103,0
16	200,58	542,36	14,21	17,8	56,8	111,0	110,0
17	359,35	534,16	16,91	14,3	58,1	121,0	120,0
18	196,39	526,54	14,41	9,9	49,3	105,0	105,0
19	184,50	499,78	13,90	18,5	59,3	118,0	117,0
20	127,97	531,48	16,40	9,3	46,6	98,7	98,4
21	214,43	526,09	14,24	18,2	58,1	114,0	114,0
22	89,31	485,05	17,30	6,1	44,3	99,8	99,5
23	201,45	478,98	18,51	5,8	47,4	110,0	109,0
24	244,78	483,04	14,32	19,2	61,4	124,0	124,0
25	316,41	447,61	14,22	23,0	71,8	143,0	143,0
26	64,04	486,12	16,40	8,0	45,8	99,3	99,2
27	138,76	424,34	15,94	12,2	57,0	122,0	122,0
28	69,55	513,44	13,97	15,0	51,4	102,0	102,0
29	81,27	569,63	19,14	1,0	34,8	84,0	83,7
30	235,66	480,30	17,03	11,2	54,6	118,0	117,0
31	161,16	528,80	15,52	12,5	50,9	105,0	105,0

Номер случая Case Number	F , кг kg	$R_{\text{бет}}$, МПа R_b , МПа	$R_{\text{арм}}$, МПа R_r , МПа	Площадь армирования S , см ² Reinforcement area S , cm ²			
				Угловая колонна Corner column	Крайняя колонна Outermost column	Средняя колонна Middle column	Центральная колонна Central column
32	288,06	537,55	18,85	7,0	48,7	108,0	108,0
33	254,42	544,61	17,53	9,6	50,1	108,0	108,0
34	246,46	448,39	14,73	19,4	65,4	133,0	133,0
35	290,84	508,33	15,75	16,2	59,4	122,0	121,0
36	243,14	509,61	17,66	9,3	51,1	111,0	111,0
37	283,21	503,67	20,39	2,6	45,7	108,0	108,0
38	99,57	460,84	19,61	0,0	39,1	98,2	97,9
39	190,32	551,65	15,43	13,4	52,0	106,0	105,0
40	179,81	491,23	20,07	2,6	42,8	102,0	102,0
41	68,76	517,18	16,83	6,4	42,7	93,5	93,2
42	211,58	502,15	16,24	12,2	53,8	113,0	113,0
43	110,78	466,14	15,06	12,9	53,8	112,0	112,0
44	300,42	469,92	14,03	23,1	69,1	137,0	136,0
45	130,06	519,86	20,42	0,6	35,8	90,0	89,8
46	232,41	450,49	18,14	8,0	53,0	121,0	121,0
47	208,67	536,66	15,06	15,4	55,0	110,0	110,0
48	121,10	526,09	16,43	9,0	46,6	98,5	98,7
49	25,28	523,05	18,52	0,6	35,0	83,7	83,4
50	187,30	484,55	15,04	16,1	57,4	118,0	117,0

Табл. 2. Значения расчетной площади армирования (несимметричное армирование)

Table 2. Reinforcement area values (asymmetric reinforcement)

Номер случая Case Number	F , кг kg	$R_{\text{бет}}$, МПа R_b , МПа	$R_{\text{арм}}$, МПа R_r , МПа	Площадь армирования S , см ² Reinforcement area S , cm ²			
				Угловая колонна Corner column	Крайняя колонна Outermost column	Средняя колонна Middle column	Центральная колонна Central column
1	240,00	435,00	14,50	16,3	61,6	134	133
2	246,65	528,36	14,27	15,7	55,8	117	116
3	257,67	456,87	11,95	25,3	71,2	141	141
4	213,91	582,02	19,26	2,56	38,4	95,2	95,2
5	103,87	527,21	15,81	7,27	44,5	98,2	98,5
6	283,22	465,74	17,75	7,04	52,9	125	124
7	283,08	516,71	17,54	7,36	49,9	114	114
8	188,95	447,54	17,05	6,72	51,6	120	119
9	216,95	496,80	14,70	14,1	55,8	119	119
10	205,24	495,37	14,83	13,5	54,8	118	118
11	177,51	497,78	16,14	8,64	49,2	111	110
12	247,53	481,95	14,28	16,6	60,2	127	127

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Номер случая Case Number	F , кг kg	$R_{\text{бет}}$, МПа R_b , МПа	$R_{\text{арм}}$, МПа R_s , МПа	Площадь армирования S , см ² Reinforcement area S , cm ²			
				Угловая колонна Corner column	Крайняя колонна Outermost column	Средняя колонна Middle column	Центральная колонна Central column
13	146,70	552,28	14,58	11,7	48,7	104	103
14	273,69	404,49	20,38	2,24	49	130	129
15	181,37	519,09	17,13	5,76	45,2	104	104
16	200,58	542,36	14,21	14,7	53,5	111	111
17	359,35	534,16	16,91	11,2	54,4	121	120
18	196,39	526,54	14,41	6,72	46,6	105	105
19	184,50	499,78	13,90	16	56,4	118	118
20	127,97	531,48	16,40	6,4	43,9	99,1	98,5
21	214,43	526,09	14,24	15	54,2	114	114
22	89,31	485,05	17,30	3,84	42	99,8	99,5
23	201,45	478,98	18,51	3,68	44,6	110	110
24	244,78	483,04	14,32	15,9	58,3	124	124
25	316,41	447,61	14,22	19,5	68	144	143
26	64,04	486,12	16,40	5,12	43	99,5	99,5
27	138,76	424,34	15,94	6,65	51,1	119	119
28	69,55	513,44	13,97	12,6	48,7	102	102
29	81,27	569,63	19,14	0,64	32,6	84,4	84
30	235,66	480,30	17,03	7,68	51,2	118	117
31	161,16	528,80	15,52	9,6	48,3	105	105
32	288,06	537,55	18,85	4,64	45,8	108	108
33	254,42	544,61	17,53	6,4	47,1	108	108
34	246,46	448,39	14,73	15,7	62,5	134	133
35	290,84	508,33	15,75	16,2	59,4	122	122
36	243,14	509,61	17,66	6,08	48	111	111
37	283,21	503,67	20,39	2,08	42	108	108
38	99,57	460,84	19,61	0,008	36,5	98,1	98,1
39	190,32	551,65	15,43	10,6	49	106	106
40	179,81	491,23	20,07	1,76	39,4	102	102
41	68,76	517,18	16,83	4,16	40	93,6	93,3
42	211,58	502,15	16,24	8,96	50,3	113	113
43	110,78	466,14	15,06	10,2	51,5	113	113
44	300,42	469,92	14,03	19,7	65,7	137	137
45	130,06	519,86	20,42	0,008	33	90,1	89,8
46	232,41	450,49	18,14	5,12	50	120	120
47	208,67	536,66	15,06	12,4	52,2	110	110
48	121,10	526,09	16,43	6,08	43,9	99,1	98,8
49	25,28	523,05	18,52	0,32	32,5	83,7	83,4
50	187,30	484,55	15,04	12,6	54,5	118	118

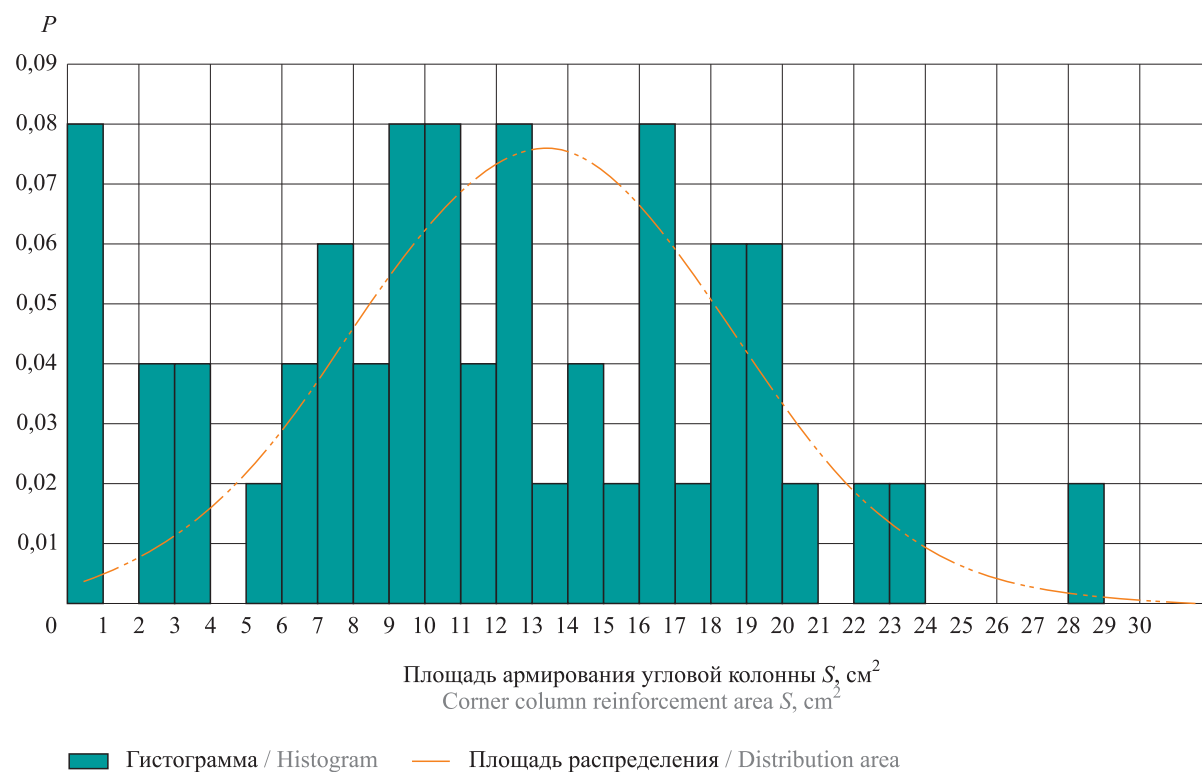


Рис. 8. Гистограмма расчетной площади армирования угловой колонны и плотность распределения площади армирования (симметричное армирование)

Fig. 8. Histogram of the reinforcement area of the corner column and the distribution density of the reinforcement area (symmetrical reinforcement)

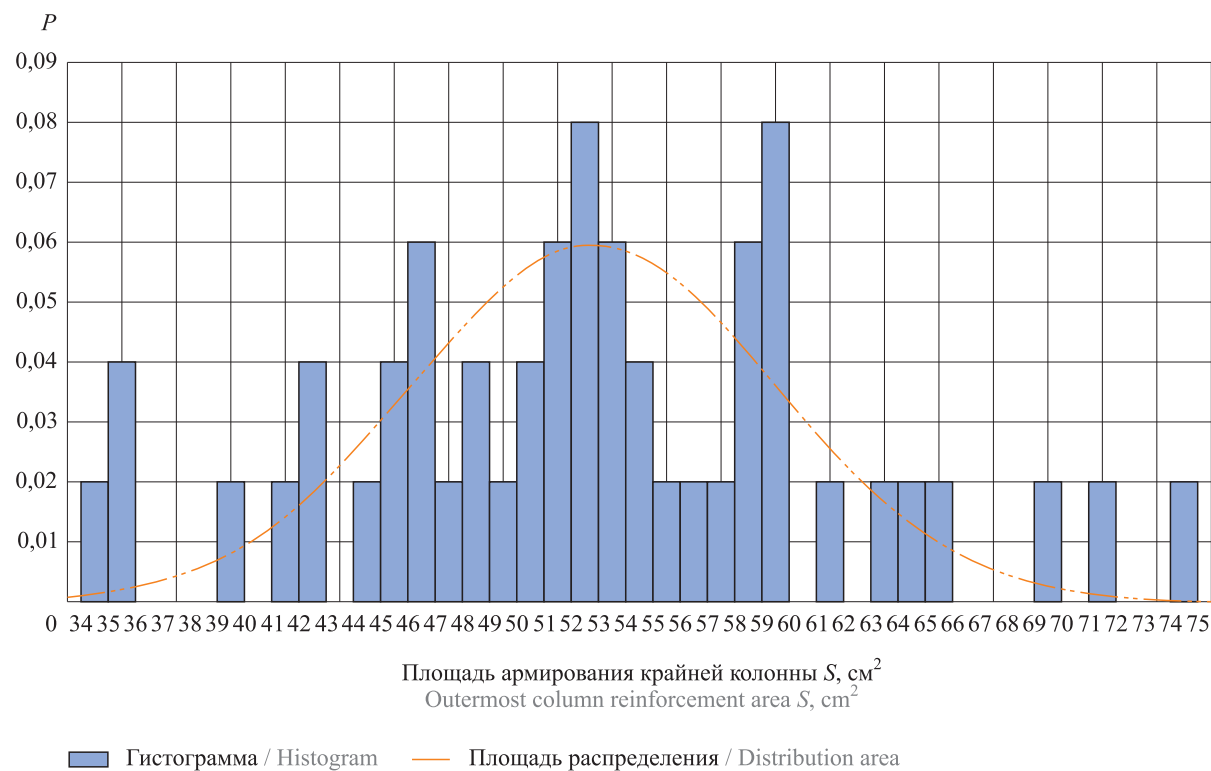


Рис. 9. Гистограмма расчетной площади армирования крайней колонны и плотность распределения площади армирования (симметричное армирование)

Fig. 9. Histogram of the reinforcement area of the outermost column and the distribution density of the reinforcement area (symmetrical reinforcement)

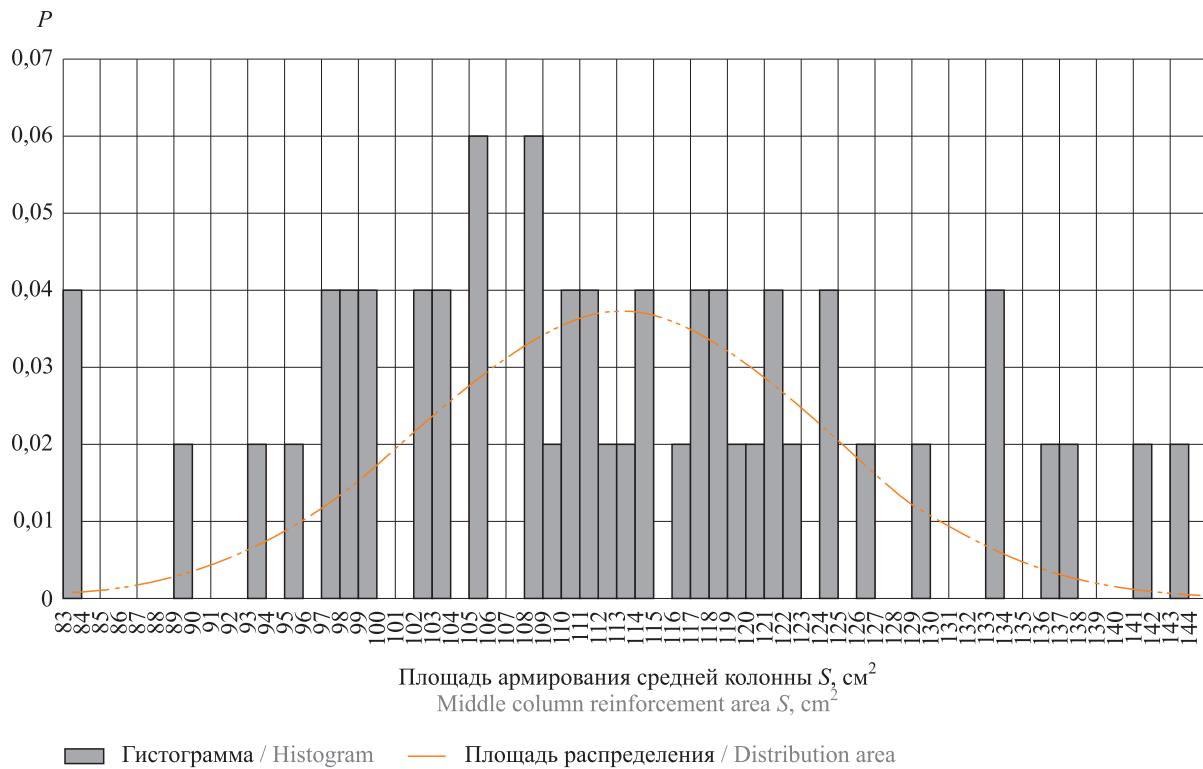


Рис. 10. Гистограмма расчетной площади армирования средней колонны и плотность распределения площади армирования (симметричное армирование)

Fig. 10. Histogram of the reinforcement area of the middle column and the distribution density of the reinforcement area (symmetrical reinforcement)

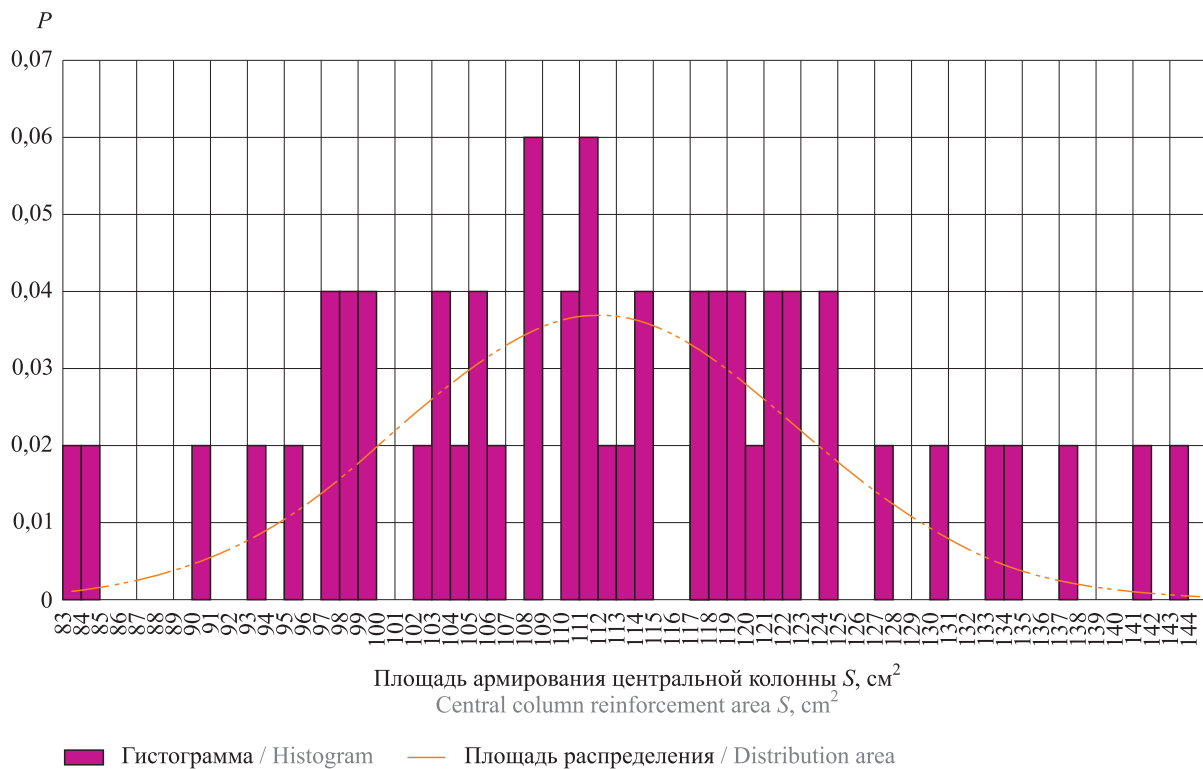


Рис. 11. Гистограмма расчетной площади армирования центральной колонны и плотность распределения площади армирования (симметричное армирование)

Fig. 11. Histogram of the reinforcement area of the central column and the distribution density of the reinforcement area (symmetrical reinforcement)

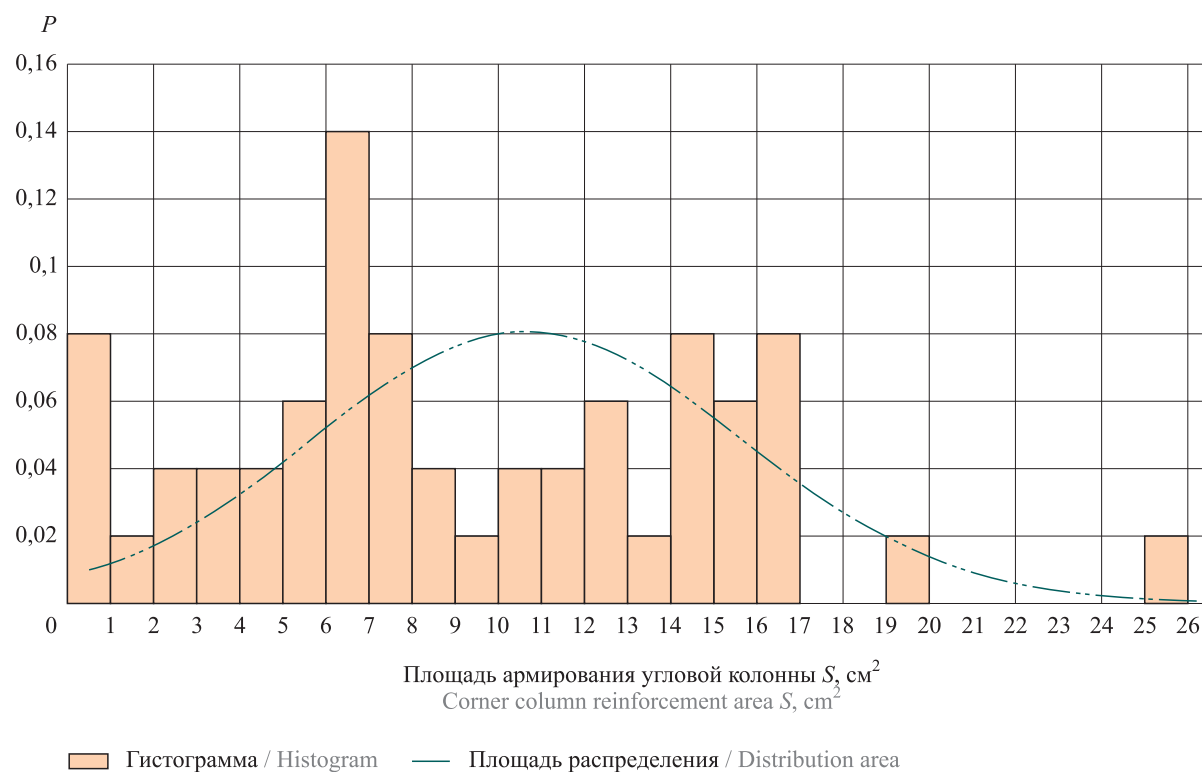


Рис. 12. Гистограмма расчетной площади армирования угловой колонны и плотность распределения площади армирования (несимметричное армирование)

Fig. 12. Histogram of the reinforcement area of the corner column and the distribution density of the reinforcement area (asymmetric reinforcement)

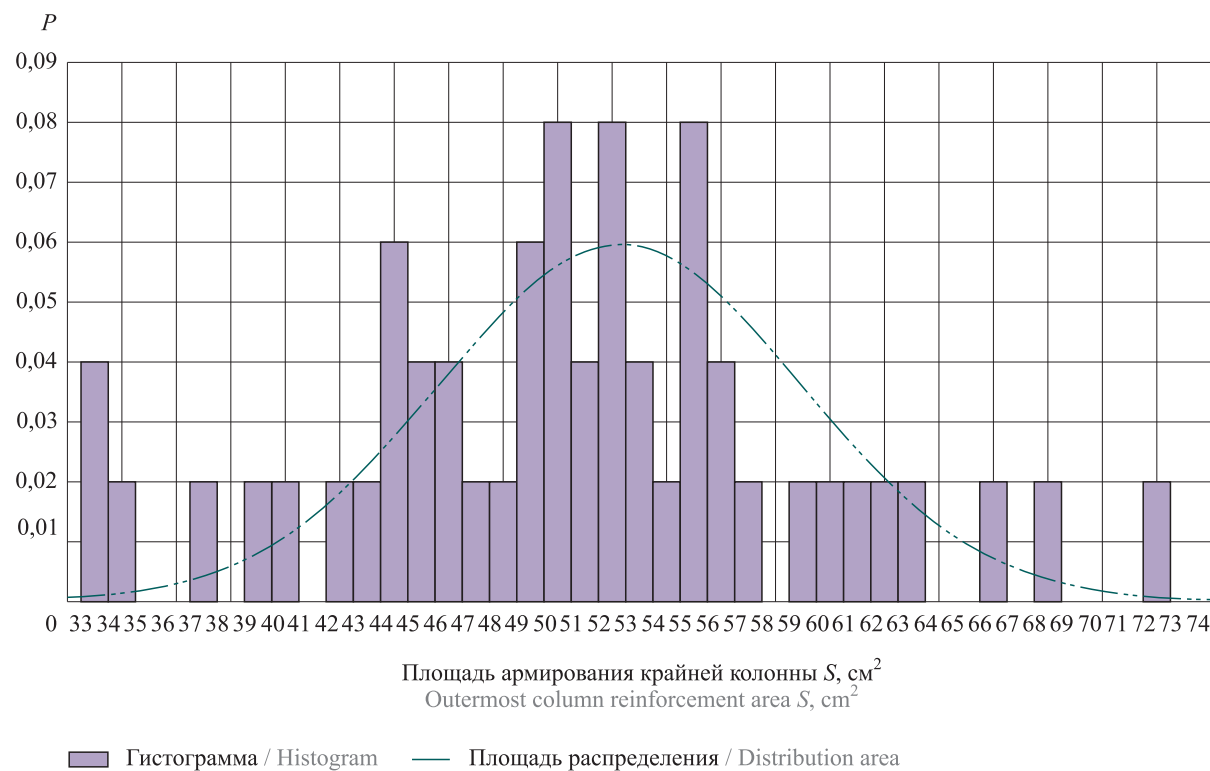


Рис. 13. Гистограмма расчетной площади армирования крайней колонны и плотность распределения площади армирования (несимметричное армирование)

Fig. 13. Histogram of the reinforcement area of the outermost column and the distribution density of the reinforcement area (asymmetric reinforcement)

Определим вероятности отказа для каждой из колонн (табл. 3), воспользовавшись выражением для функции распределения нормального закона:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right) dx. \quad (15)$$

Табл. 3. Полученные значения вероятности отказа

Table 3. Obtained values of the probability of failure

Колонна Column	Вероятность отказа P_f Failure Probability P_f	
	Симметричное армирование Symmetric reinforcement	Несимметричное армирование Asymmetric reinforcement
Угловая Corner	0,02604	0,02849
Крайняя Outermost	0,01127	0,01175
Средняя Middle	0,00472	0,00470
Центральная Central	0,00512	0,00523

Для каждой из колонн вычислим соответствующий риск $Risk$ (табл. 4):

$$Risk = P_f U, \quad (16)$$

где U — ущерб, который можно принять равным грузовой площади соответствующей колонны (в относительных единицах для угловой колонны — $U=0,25$; для крайней колонны — $U=0,5$; для средней и центральной колонн — $U=1$).

Одним из возможных подходов к определению поправочного коэффициента к коэффициенту надежности по ответственности γ_n является дифференцирование уровня ответственности для соответствующих несущих элементов (колонн).

Условно примем риск для средней колонны равным 1, тогда, используя выражение (16), можно получить поправочные коэффициенты для остальных несущих элементов нижнего яруса (колонн) из условия равенства рисков.

Обозначим поправочные коэффициенты γ_n^y , γ_n^k , γ_n^c , γ_n^u (для угловой, крайней, средней и центральной колонн соответственно). Полученные поправочные коэффициенты приведены в табл. 5.

Табл. 4. Полученные значения риска $Risk$

Table 4. Obtained risk values $Risk$

Армирование Reinforcement	Угловая колонна Corner column	Крайняя колонна Outermost column	Средняя колонна Middle column	Центральная колонна Central column
Симметричное армирование Symmetric reinforcement	0,65	0,56	0,47	0,51
Несимметричное армирование Asymmetric reinforcement	0,71	0,59	0,47	0,52

Табл. 5. Поправочные коэффициенты

Table 5. Correction factors

Армирование Reinforcement	γ_n^y	γ_n^k	γ_n^c	γ_n^u
Симметричное армирование Symmetric reinforcement	1,38	1,19	1,00	1,08
Несимметричное армирование Asymmetric reinforcement	1,51	1,25	1,00	1,10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработана вероятностная методика оценки надежности несущих элементов железобетонного безригельного связевого каркаса на основе метода статистических испытаний теории надежности строительных конструкций. Для средних, крайних и угловых колонн нижнего яруса получены поправочные коэффициенты, которые позволили определить коэффициенты надежности по ответственности для данных отдельных элементов из условия равенства рисков при аварийных воздействиях. Предложенный подход позволяет оптимизировать конструктивные решения железобетонных зданий по расходу материалов с обеспечением необходимого уровня надежности и механической безопасности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мкртычев О.В., Райзер В.Д. Теория надежности в проектировании строительных конструкций. М. : Изд-во АСВ, 2016, 908 с.
2. Джинчелашвили Г.А., Колесников А.В., Бондарь Н.М. Критический анализ и перспективы развития современной теории сейсмостойкости соору-

жений // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2013. Т. 9. № 1. С. 53–58.

3. Тяпин А.Г. Современные нормативные подходы к расчету ответственных сооружений на сейсмические воздействия. М. : Изд-во АСВ, 2018. 517 с.

4. Курбацкий Е.Н., Мазур Г.Э., Мондрус В.Л. Критический анализ состояния нормативной документации по расчету сооружений на землетрясения // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 2. С. 95–102.
5. Мкртычев О.В., Булушев С.В. Оценка коэффициента учета допускаемых повреждений для железобетонного пространственного здания при землетрясении // Проблемы научно-практической деятельности. Перспективы внедрения инновационных решений : сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. 2019. С. 64–69.
6. Соснин А.В. Об уточнении коэффициента допускаемых повреждений K1 и его согласованности с концепцией редукиции сейсмических сил в постановке спектрального метода (в порядке обсуждения) // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1 (60). С. 92–114.
7. Даулетбаев Р.Б., Вовк Б.В. Надежность строительных конструкций зданий и сооружений в процессе их эксплуатации // Инновации и инвестиции. 2019. № 5. С. 173–177.
8. Krivulina E.F., Kanevskaya I.Yu. Estimation of the reliability of a rectangular frame made of the porous metal in terms of its rigidity on the basis of probabilistic approach // Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. 2018. Vol. 53. Pp. 107–115. DOI: 10.17223/19988621/53/10
9. Тамразян А.Г. Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов — необходимое условие безопасности зданий и сооружений // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко «Исследования по теории сооружений». 2009. № 1. С. 160–171.
10. Zhang J., Hu X., Gong S., Shi D., Feng J., Yan M. Seismic behavior of single plate shear connection between steel-concrete composite beam and RC column // Structures. 2022. Vol. 37. Pp. 833–848. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.01.058
11. Mkrtychev O.V., Lokhova E.M. Accumulation of damage in reinforced concrete elements under cyclic loads // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1015. Issue 1. P. 012038. DOI: 10.1088/1757-899x/1015/1/012038
12. Zhou J., Fang X., Jiang Y., Yang J. Cyclic experiments on concrete-encased CFST wall-RC coupling beam joints with non-through-core anchorages // Journal of Earthquake Engineering. 2022. Vol. 26. Issue 3. Pp. 1518–1524. DOI: 10.1080/13632469.2020.1733141
13. Чаускин А.Ю., Пшеничкина В.А. Вероятностный расчет нелинейной динамической системы на сейсмическое воздействие уровня МР3 // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. № 47 (66). С. 82–92.
14. Ву Нгок Туен. Исследование живучести железобетонной конструктивно-нелинейной рамно-стержневой системы каркаса многоэтажного здания в динамической постановке // Строительство и реконструкция. 2020. № 4 (90). С. 73–84. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-90-4-73-84
15. Bermejo M., Santos A., Goicolea J.M. A methodology to calibrate structural finite element models for reinforced concrete structures subject to blast loads // Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2014. 2014. Pp. 3497–3502.
16. Melchers R.E., Beck A.T. Structural reliability: Analysis and prediction. JohnWiley & Sons Ltd, 2018. 506 p.
17. Тамразян А.Г. Расчет элементов конструкций при заданной надежности и нормальном распределении нагрузки и несущей способности // Вестник МГСУ. 2012. № 10. С. 109–115. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.10.109-115
18. Raizer V.D. Theory of reliability in structural design // Applied Mechanics Reviews. 2004. Vol. 57. Issue 1. Pp. 1–21. DOI: 10.1115/1.1584065
19. Мондрус В.Л., Мкртычев О.В., Мкртычев А.Э. Исследование большепролетного сооружения на надежность при случайных сейсмических воздействиях // Вестник МГСУ. 2012. № 1. С. 56–61.
20. Булушев С.В. Оценка сейсмостойкости зданий с рамным каркасом на основе вероятностного нелинейного динамического анализа : дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 154 с.

Поступила в редакцию 12 июля 2022 г.

Принята в доработанном виде 4 октября 2022 г.

Одобрена для публикации 4 октября 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: Олег Варганович Мкртычев — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов, директор НИЦ «Надежность и сейсмостойкость сооружений»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 386561, Scopus: 56449249100, ResearcherID: Q-2370-2017, ORCID: 0000-0002-2828-3693; mkrtychev@yandex.ru;

Олег Сергеевич Щедрин — аспирант, заместитель начальника отдела конструктивной надежности и безопасности объектов; **Главгосэкспертиза России;** 119049, г. Москва, ул. Большая Якиманка, д. 42, стр. 1–2; SPIN-код: 1332-5433, ORCID: 0000-0002-7737-8701; oshedrin@mail.ru;

Екатерина Михайловна Лохова — аспирант, инженер НИЦ «Надежность и сейсмостойкость сооружений»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 3530-6216, ORCID: 0000-0001-8988-4516; elm97@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Mkrtychev O.V., Raiser V.D. *Reliability theory in the design of building structures*. Moscow, DIA Publishing House, 2016; 908. (rus.).
2. Dzhinchvelashvili G.A., Kolesnikov A.V., Bondar N.M. The critical analysis and prospects of development of the modern theory of seismic stability of constructions. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2013; 9(1):53-58. (rus.).
3. Tyapin A.G. *Modern normative approaches to the calculation of critical structures for seismic impacts*. Moscow, DIA Publishing House, 2018; 518. (rus.).
4. Kurbatskiy E.N., Mazur G.E., Mondrus V.L. Critical analysis of condition of the normative documents on calculation of structures for earthquake. *Academia. Architecture and Construction*. 2017; 2:95-102. (rus.).
5. Mkrtychev O.V., Bulushev S.V. Evaluation of the allowable damage accounting coefficient for a reinforced concrete spatial building during an earthquake. *Problems of scientific and practical activities. Prospects for the implementation of innovative solutions : collection of articles of the All-Russian scientific and practical conference*. 2019; 64-69. (rus.).
6. Sosnin A.V. About refinement of the seismic-force-reduction factor (k_1) and its coherence with the concept of seismic response modification in formulation of the spectrum method (in order of discussion). *Bulletin of Civil Engineers*. 2017; 1(60):92-116. (rus.).
7. Dauletbaev R.B., Vovk B.V. Reliability of building structures of buildings and structures during their operation. *Innovations and Investments*. 2019; 5: 173-177. (rus.).
8. Krivulina E.F., Kanevskaya I.Yu. Estimation of the reliability of a rectangular frame made of the porous metal in terms of its rigidity on the basis of probabilistic approach. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2018; 53:107-115. DOI: 10.17223/19988621/53/10
9. Tamrazyan A.G. Assessment of risk and reliability of bearing structures and key elements — a necessary condition for the safety of buildings and structures. *Vestnik TsNIISK named after V.A. Kucherenko "Research on the theory of structures"*. 2009; 1:160-171. (rus.).
10. Zhang J., Hu X., Gong S., Shi D., Feng J., Yan M. Seismic behavior of single plate shear connection between steel-concrete composite beam and RC column. *Structures*. 2022; 37:833-848. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.01.058
11. Mkrtychev O.V., Lokhova E.M. Accumulation of damage in reinforced concrete elements under cyclic loads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1015(1):012038. DOI: 10.1088/1757-899x/1015/1/012038
12. Zhou J., Fang X., Jiang Y., Yang J. Cyclic experiments on concrete-encased CFST wall-RC coupling beam joints with non-through-core anchorages. *Journal of Earthquake Engineering*. 2022; 26(3):1518-1524. DOI: 10.1080/13632469.2020.1733141
13. Chauskina A.Yu., Pshenichkina V.A. Probability calculation of dynamic nonlinear system on seismic load of maximum credible earthquake level. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture*. 2017; 47(66):82-92. (rus.).
14. Vu Ngoc Tuyen. Study of survivability of reinforced concrete constructive nonlinear frame-rod system of a multi-story building frame in a dynamic formulation. *Building and Reconstruction*. 2020; 4(90):73-84. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-90-4-73-84 (rus.).
15. Bermejo M., Santos A., Goicolea J.M. A methodology to calibrate structural finite element models for reinforced concrete structures subject to blast loads. *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURO-DYN 2014*. 2014; 3497-3502.
16. Melchers R.E., Beck A.T. *Structural Reliability: Analysis and Prediction*. John Wiley & Sons Ltd, 2018; 506.
17. Tamrazyan A.G. Design of structural elements in the event of the preset reliability, regular load and bearing capacity distribution. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 10:109-115. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.10.109-115 (rus.).
18. Raizer V.D. Theory of reliability in structural design. *Applied Mechanics Reviews*. 2004; 57(1):1-21. DOI: 10.1115/1.1584065
19. Mondrus V.L., Mkrtychev O.V., Mkrtychev A.E. Research of reliability of a long-span structure exposed to random seismic impacts. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2012; 5:56-61. (rus.).
20. Bulushev S.V. *Estimation of seismic resistance of buildings with a frame frame based on probabilistic nonlinear dynamic analysis : diss. ... cand. tech. sciences*. Moscow, 2020; 154. (rus.).

Received July 12, 2022.

Adopted in revised form on October 4, 2022.

Approved for publication on October 4, 2022.

B I O N O T E S : **Oleg V. Mkrtychev** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Strength of Materials, Director of the Research Center “Reliability and Seismic Resistance of Structures”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 386561, Scopus: 56449249100, ResearcherID: Q-2370-2017, ORCID: 0000-0002-2828-3693; mkrtychev@yandex.ru;

Oleg S. Shchedrin — postgraduate student, Deputy Head of the Department of Structural Reliability and Safety of Objects; **Glavgosexpertiza of Russia**; bldg. 1–2, 42 Bolshaya Yakimanka st., Moscow, 119049, Russian Federation; SPIN-code: 1332-5433, ORCID: 0000-0002-7737-8701; oshedrin@mail.ru;

Ekaterina M. Likhova — postgraduate student, engineer, Research Center “Reliability and seismic resistance of structures”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 3530-6216, ORCID: 0000-0001-8988-4516; elm97@mail.ru.

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

The authors declare no conflicts of interest.

Расчет на устойчивость решетчатых элементов стальных конструкций

Григорий Иванович Белый

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Практический метод расчета решетчатых элементов стальных конструкций на местную и общую устойчивость содержит внутреннее противоречие. Проверка общей устойчивости предполагает наличие дополнительной стрелки изгиба ветви в плоскости решетки, а проверка местной устойчивости отрицает ее, что не гарантирует обеспечение местной устойчивости при проверке общей устойчивости решетчатого стержня. Расчетные комбинации усилий на концах любого элемента конструкции при действии одних и тех же расчетных сочетаний нагрузок практически всегда имеют различные значения. Следовательно, продольные усилия в ветвях решетчатых элементов, выделенных по расчетной длине из плоскости решетки, всегда будут переменными, что не учитывается в действующих нормах проектирования.

Материалы и методы. Для устранения этого противоречия предложен аналитический метод решения задачи общей устойчивости решетчатых элементов стальных конструкций с учетом обеспечения местной устойчивости наиболее нагруженной ветви. Решение задачи устойчивости ветви из плоскости решетки (двухветвевые элементы) проводится с использованием обратного численно-аналитического метода: по заданному напряженно-деформированному состоянию в наиболее нагруженном сечении упругой ветви численно определяются действующие и фиктивные, компенсирующие развитие пластических деформаций, деформационные усилия. Затем обратным аналитическим решением деформационной задачи устанавливается фактическое нагружение ветви на ее концах.

Результаты. Коэффициент общей устойчивости решетчатых элементов определяется решением квадратного уравнения, включающего дополнительную зависимость от коэффициента устойчивости ветви в плоскости решетки. Коэффициент устойчивости ветви из плоскости решетки получен при общем случае нагружения продольной силой с различными значениями концевых эксцентриситетов в сочетании с равномерно распределенной осевой нагрузкой.

Выводы. Предложено аналитическое решение задачи общей устойчивости решетчатых элементов с учетом обеспечения устойчивости ветви. Получено решение задачи устойчивости ветви из плоскости решетки (двухветвевые элементы) при фактическом ее нагружении переменной продольной силой, действующей с различными значениями концевых эксцентриситетов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: решетчатый стержневой элемент, общая устойчивость, местная устойчивость, приведенная гибкость, устойчивость ветви, упругопластические деформации, фиктивные усилия, численно-аналитический метод

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Белый Г.И. Расчет на устойчивость решетчатых элементов стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 10. С. 1347–1357. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1347-1357

Автор, ответственный за переписку: Григорий Иванович Белый, office@erkon.ru.

To the calculation of the stability of lattice elements of steel structures

Grigory I. Belyi

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
Saint-Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The practical method of calculating lattice elements of steel structures for local and general stability contains an internal contradiction. The general stability check assumes the presence of an additional branch bending arrow in the lattice plane, and the local stability check negates it, which does not guarantee local stability when checking the general stability of the lattice rod. The calculated combinations of forces at the ends of any structural element, under the action of the same calculated combinations of loads, almost always have different values. Consequently, the longitudinal forces in the branches of the lattice elements, separated by the calculated length from the lattice plane, will always be variable, which is not taken into account in the current design standards.

Materials and methods. To eliminate the mentioned contradiction, an analytical method is proposed for solving the problem of general stability of lattice elements of steel structures, taking into account the provision of local stability of the most loaded branch. The solution of the problem of stability of a branch from the lattice plane (two-branched elements) is carried out using the inverse numerical-analytical method: according to a given stress-strain state in the most loaded section of the elastic branch, acting and fictitious, compensating for the development of plastic deformations, deformation forces are numerically

determined. Then, by the inverse analytical solution of the deformation problem, the actual loading of the branch at its ends is established.

Results. The coefficient of overall stability of lattice elements is determined by solving a quadratic equation that includes an additional dependence on the coefficient of stability of the branch in the lattice plane. The stability coefficient of the branch from the lattice plane is obtained in the general case of loading by a longitudinal force with different values of end eccentricities in combination with a uniformly distributed axial load.

Conclusions. An analytical solution to the problem of general stability of lattice elements is proposed, taking into account the stability of the branch. The solution of the problem of stability of a branch from the lattice plane (two-branched elements) is obtained when it is actually loaded with a variable longitudinal force acting with different values of terminal eccentricities.

KEYWORDS: lattice rod element, general stability, local stability, reduced flexibility, branch stability, elastic-plastic deformations, fictitious forces, numerical-analytical method

FOR CITATION: Belyi G.I. To the calculation of the stability of lattice elements of steel structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(10):1347-1357. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1347-1357 (rus.).

Corresponding author: Grigory I. Belyi, office@erkon.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования устойчивости пространственных решетчатых (сквозных) стержней, среди которых основополагающие работы С.П. Тимошенко [1], Б.М. Броуде [2], В.И. Трофимова [3], Н.С. Стрелецкого [4], А.Р. Ржаницына [5], позволившие обосновать практический метод расчета по формулам и таблицам, как для сплошностенчатых элементов. При этом влияние деформаций сдвига было сведено к увеличению длины решетчатого стержня, по которой устанавливалась его приведенная гибкость. Основные расчетные положения дополнялись результатами исследований напряженно-деформированных и предельных состояний трехгранных [6–8], четырехгранных [2, 9–11] и двухветвевых [2, 12–14] стержней. Из зарубежных публикаций, направленных на совершенствование метода расчета решетчатых стержней, необходимо отметить труды [15–18].

1. На основании упомянутых и многих других исследований разработан практический метод расчета решетчатых элементов стальных конструкций на местную и общую устойчивость¹, который, как заметил В.В. Горев [19], содержит внутренние противоречия. Проверка общей устойчивости предполагает наличие дополнительной стрелки изгиба (как результат деформационного расчета), а проверка местной устойчивости отрицает ее. Это не гарантирует обеспечение местной устойчивости ветвей при проверке общей устойчивости решетчатого стержня, поскольку последняя выполняется при наличии в ветвях усилий, явно превышающих значения, допускаемые по условиям местной устойчивости.

Отмеченное противоречие имеет место при использовании «нормативной»¹ схемы загрузки, выделенного из конструкции по расчетной длине решетчатого стержня — загрузки продольной силой с равными концевыми эксцентриситетами, соответствующими максимальному значению изгибающего момента. При этом предполагается, что последний незначительно изменяется по длине стержня. В противном случае, проверка общей устойчивости

по СП 16.13330.2017¹ всегда будет выполняться с некоторым запасом. Фактические значения деформационного усилия в ветви решетчатого стержня могут оказаться не превышающими допускаемые по условиям местной устойчивости, что требует проведения специального исследования.

В.В. Горев, анализируя изложенные им противоречия, предложил новый метод расчета решетчатых конструкций по деформированной схеме, не требующий их раздельной проверки на общую и местную устойчивость [19–21], в соответствии с которым расчет внецентренно сжатых и сжато-изогнутых сквозных элементов с решетками, расположенных в плоскостях, параллельно плоскости изгиба, совпадающей с плоскостью симметрии, рекомендовано выполнять по формуле:

$$\frac{N}{\Phi_e^* \Phi_{yB} A R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (1)$$

где Φ_{yB} — коэффициент устойчивости ветви в плоскости, параллельной решетке; Φ_e^* — коэффициент общей устойчивости, принимаемый по табл. Д. 4 СП 16.13330.2017¹ в зависимости от скорректированной коэффициентом Φ_{yB} условной приведенной гибкости $\bar{\lambda}_{ef}^* = \bar{\lambda}_{ef} \sqrt{\Phi_{yB}}$ ($\bar{\lambda}_{ef} = \lambda_{ef} \sqrt{R_y/E}$) и относительного эксцентриситета $m_y = e_x^2 c / i_y^2$ (c — расстояние от главной свободной оси сечения, перпендикулярной плоскости изгиба, до оси наиболее сжатой ветви; $e_x^0 = M_y/N$; $i_y^2 = I_y/A$).

Видно, что вместо одного коэффициента общей устойчивости Φ_e , соответствующего расчету по СП 16.13330.2017¹, в формуле (1) приведено произведение: Φ_e^* — коэффициента общей устойчивости по уточненной гибкости и Φ_{yB} — коэффициента местной устойчивости.

2. Расчет на устойчивость ветвей из плоскости решетки по действующим нормам проектирования¹ производится по максимальной величине продольной силы, что может приводить к существенному снижению несущей способности. Продольные силы, действующие на концах выделенной расчетной длины

¹ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М., 2017. 139 с.

ветви из плоскости решетки, при любом расчетном сочетании нагрузок, как известно, практически всегда имеют различные значения. Поэтому расчет на устойчивость ветвей следует проводить при фактически действующей переменной продольной силе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей статье предлагается аналитическое решение деформационной задачи внецентренно-сжатого решетчатого стержня с учетом обеспечения устойчивости ветви. При этом влияние физической нелинейности, которая проявляется до площадки текучести, компенсируется дополнительным догружением относительно небольшими фиктивными моментами.

Решение задачи устойчивости ветви из плоскости решетки (двухветвевые элементы) выполняется с помощью обратного численно-аналитического метода: по заданному напряженно-деформированному состоянию (НДС) в наиболее нагруженном сечении упругой ветви численно определяются действующие и фиктивные, компенсирующие развитие пластических деформаций, деформационные усилия. Затем обратным аналитическим решением деформационной задачи устанавливается фактическое нагружение ветви на ее концах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Коэффициент общей устойчивости решетчатых элементов определяется решением квадратного уравнения, включающего дополнительную зависимость от коэффициента устойчивости ветви в плоскости решетки. В последнем может учитываться влияние дефектов и повреждений ветви на общую устойчивость решетчатого стержня, что является весьма важным при оценке технического состояния эксплуатируемых стальных конструкций.

Коэффициент устойчивости ветви из плоскости решетки получен при фактическом нагружении продольной силой с различными значениями концевых эксцентриситетов в сочетании с равномерно распределенной осевой нагрузкой. Решение этих задач позволяет вскрыть существенные резервы устойчи-

вости ветви по сравнению с теми, которые определяются по СП 16.13330.2017¹.

Расчет на общую устойчивость решетчатых стержней при обеспеченной устойчивости ветви

На первом этапе рассмотрим решение задачи без обеспечения устойчивости ветви $\varphi_{ув} = 1$. Для чего используем широко известное приближенное решение деформационной задачи внецентренно-сжатого упругого стержня, в соответствии с которым перемещение точек оси определяется по формуле:

$$u(z) = u^o(z) \left(1 - \frac{N}{N_{cr}} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где $u^o(z)$ — перемещение, полученное недеформационным расчетом; N_{cr} — критическая сила, определяемая по приведенной гибкости λ_{ef} .

Аналитическое решение (2) применительно к «нормативной»¹ расчетной модели обладает высокой точностью. Деформационный момент в наиболее нагруженном среднем ($\bar{z} = z/l = 0,5$) сечении упругого стержня в соответствии с выражением (2) представим в виде [22]:

$$M_y = N \cdot e_x^o \left[1 + \frac{\Phi_e \bar{\lambda}_{ef}^2}{8} \left(1 - \frac{\Phi_e \bar{\lambda}_{ef}^2}{\pi^2} \right)^{-1} \right]. \quad (3)$$

Для определения осевых напряжений в указанном сечении ветви воспользуемся унифицированной диаграммой работы стали $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$ (рис. 3). Тогда, используя формулу (3) при $\bar{\sigma}_{ув} = \sigma_{ув}/R_y \leq 0,8$, получим:

$$\bar{\sigma}_{ув} = \Phi_e \left[1 + m_y^o \left(1 + \frac{\Phi_e \bar{\lambda}_{ef}^2}{8} \left(1 - \frac{\Phi_e \bar{\lambda}_{ef}^2}{\pi^2} \right)^{-1} \right) \right] \leq 0,8. \quad (4)$$

Влияние физической нелинейности при $\bar{\sigma}_{ув} = 0,8-1,0$ (рис. 3) компенсируем дополнительным догружением относительно небольшим фиктивным моментом с эксцентриситетом $m_{уф}^o$. Значение последнего будем искать таким образом, чтобы получить Φ_e , соответствующее значениям табл. Д. 4 СП 16.13330.2017¹ при $\bar{\sigma}_{ув} = 1,0$. Этому соответствует $m_{уф}^o = 0,008 + 0,037\lambda_{ef}$ тогда

$$\bar{\sigma}_{ув} = \Phi_e \left[1 + (m_y^o + m_{уф}^o) \left(1 + \frac{\Phi_e \bar{\lambda}_{ef}^2}{8} \left(1 - \frac{\Phi_e \bar{\lambda}_{ef}^2}{\pi^2} \right)^{-1} \right) \right] = 1, \quad (5)$$

из которого следует:

$$\Phi_e = \frac{b}{2a} - \sqrt{\frac{b^2}{4a^2} - \frac{1}{a}}, \quad (6)$$

где

$$a = \frac{\bar{\lambda}_{ef}^2}{\pi^2} \left[1 - (m_y^o + m_{уф}^o) \cdot 0,2337 \right];$$

$$b = 1 + (m_y^o + m_{уф}^o) + \frac{\bar{\lambda}_{ef}^2}{\pi^2}.$$

В табл. 1 приведено сопоставление Φ_e по выражению (6) с $\Phi_{e,сп}$ по табл. Д. 4 СП 16.13330.2017¹, из которой следует, что определение Φ_e в аналитическом виде по формуле (6) является вполне приемлемым.

Табл. 1. Сопоставление коэффициентов φ_e по формуле (6) с нормативным значением $\varphi_e/\varphi_{e,сп}$ Table 1. Comparison of coefficients φ_e according to (6) with the normative value $\varphi_e/\varphi_{e,sp}$

Условная приведенная гибкость $\bar{\lambda}_{ef}$ Conditional reduced flexibility $\bar{\lambda}_{ef}$	Относительный эксцентриситет m_x Relative eccentricity m_x							
	0,25	0,5	1	1,5	2	3	4	8
1	0,990	0,982	0,981	0,986	0,974	0,994	0,987	1,002
2	1,000	1,004	1,002	0,997	0,996	0,983	0,996	0,990
3	1,006	1,012	1,007	1,005	1,002	0,999	1,006	0,989
4	0,979	1,006	1,012	1,009	1,011	1,014	1,019	0,985
5	0,966	0,991	1,011	1,012	1,021	1,012	1,020	–

Таким образом, используя унифицированную диаграмму работы стали и модель упругого стержня, с дополнительным догрузением фиктивным моментом, компенсирующее физическую нелинейность при $\bar{\sigma}_{yв} = 0,8\text{--}1,0$, получено решение деформационной задачи решетчатого стержня в аналитической форме, что удобно в практическом применении.

На втором этапе будем учитывать влияние фактически воспринимаемого усилия ветвью (выраженного $\varphi_{yв}$) на общую устойчивость (коэффициент $\varphi_{e,d}$) решетчатого стержня. Принимая $\bar{\sigma}_{yв} = \varphi_{yв}$, получим при $\varphi_{yв} > 0,8$:

$$\varphi_{e,d} \left[1 + \left(m_y^o + m_{yф}^o \cdot \frac{\varphi_{yв} - 0,8}{0,2} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(1 + \frac{\varphi_{e,d} \bar{\lambda}_{ef}^2}{8} \left(1 - \frac{\varphi_{e,d} \bar{\lambda}_{ef}^2}{\pi^2} \right)^{-1} \right) \right] = \varphi_{yв}; \quad (7)$$

при $\varphi_{yв} \leq 0,8$ принимаем $m_{yф}^o = 0$.

Решение квадратного уравнения (7) можно представить в аналогичном выражению (6) виде:

$$\varphi_{e,d} = \frac{b_1}{2a_1} - \sqrt{\frac{b_1^2}{4a_1^2} - \frac{1}{a_1}}, \quad (8)$$

где

$$a_1 = \frac{\bar{\lambda}_{ef}^2}{\pi^2 \varphi_{yв}} \left[1 - \left(m_y^o + m_{yф}^o \cdot \frac{\varphi_{yв} - 0,8}{0,2} \right) \cdot 0,2337 \right];$$

$$b_1 = \frac{1 + \left(m_y^o + m_{yф}^o \cdot \frac{\varphi_{yв} - 0,8}{0,2} \right)}{\varphi_{yв}} + \frac{\bar{\lambda}_{ef}^2}{\pi^2}.$$

Результаты расчета по формуле (8) $\varphi_{e,d}$ приведены в табл. 2 в зависимости от $\varphi_{yв}$, m_x и $\bar{\lambda}_{ef}$, которые сопоставляются с φ_e по табл. Д. 4 СП 16.13330.2017¹

(см. вторую строку по каждой $\bar{\lambda}_{ef}$). При $\varphi_{e,d}/\varphi_e \geq 1$, значения которых выделены в таблице, можно утверждать, что упомянутые противоречия между общей и местной устойчивостью отсутствуют. Это относится к стержням с относительно большими значениями $\varphi_{yв}$ и $\bar{\lambda}_{ef}$ при малых эксцентриситетах продольной силы m_x .

В подавляющем большинстве остальных случаев обеспечение устойчивости ветви в рамках проверки общей устойчивости может приводить к существенному снижению несущей способности, определяемой по СП 16.13330.2017¹. Если при больших значениях $\varphi_{yв} = 0,948$ ($\bar{\lambda}_{yв} = 1$) для стержней гибкостью $\bar{\lambda}_{ef} \leq 3$ наблюдается незначительное снижение общей устойчивости, находящейся в пределах 2,4–6,1 % ($\varphi_{e,g}/\varphi_e = 0,976\text{--}0,939$), то с уменьшением устойчивости ветвей $\varphi_{yв} = 0,826$ ($\bar{\lambda}_{yв} = 2$) общая устойчивость существенно снижается до 17,9 % (см. $\varphi_{e,d}/\varphi_e$ при $\bar{\lambda}_{ef} = 1$ и $m_x = 2$).

В табл. 2 приведено также сопоставление результатов, полученных по предложенному В.В. Горевым методу [19], с данными проведенного исследования $\varphi_e^* \cdot \varphi_{yв}/\varphi_{e,d}$. Видно, что разработанный в работе [19] метод неоправданно занижает общую устойчивость, поскольку в последнем в качестве исходного предположения (независимо от φ_e) было принято $\bar{\sigma}_{yв} = 1$. Снижение значений $\varphi_e^* \cdot \varphi_{yв}/\varphi_{e,g}$ можно наблюдать по мере увеличения гибкости $\bar{\lambda}_{ef}$ при малых эксцентриситетах $m_x = 0,25\text{--}2,0$, которое составляет 0,974–0,832, что соответствует занижению фактической несущей способности на 2,6–16,8 %. При этом полученные значения $\varphi_e^* \cdot \varphi_{yв}/\varphi_{e,d}$ практически не зависят от значения $\varphi_{yв}$.

В заключение отметим, что предположенное решение деформационной задачи (определение коэффициента $\varphi_{e,d}$) позволяет учесть влияние расцентровки узлов решетки и (или) дефектов и повреждений ветви на общую устойчивость решетчатого элемента, что является весьма важным при оценке технического состояния эксплуатируемых конструкций.

Табл. 2. Сопоставление коэффициентов общей устойчивости $\varphi_{e,g}$ по формуле (8) с φ_e по СП 16.13330.2017 и $\varphi_e^* \cdot \varphi_B$ по В.В. Гореву

Table 2. Comparison of the coefficients of general stability $\varphi_{e,g}$ according to the formula (8) with φ_e according to SP 16.13330.2017 and $\varphi_e^* \cdot \varphi_B$ according to V.V. Gorev

$\bar{\lambda}_{ef}$	Обозначение Designation	$\varphi_B = 0,948 (\bar{\lambda}_B = 1)$ при m_x равном $\varphi_V = 0,948 (\bar{\lambda}_V = 1)$ with m_x equal to						$\varphi_B = 0,826 (\bar{\lambda}_B = 2)$ при m_x равном $\varphi_V = 0,826 (\bar{\lambda}_V = 2)$ with m_x equal to					
		0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0
1,0	$\varphi_{e,d}$	723	602	453	305	185	104	646	536	401	269	162	091
	$\varphi_{e,d}/\varphi_e$	0,949	0,940	0,937	0,928	0,938	0,954	0,848	0,837	0,831	0,819	0,824	0,834
	$\varphi_e^* \cdot \varphi_B / \varphi_{e,d}$ $\varphi_e^* \cdot \varphi_V / \varphi_{e,d}$	1,002	1,011	1,014	1,022	1,011	0,995	0,983	0,994	1,001	1,011	1,005	0,993
2,0	$\varphi_{e,d}$	654	540	409	280	174	101	605	495	370	251	155	089
	$\varphi_{e,d}/\varphi_e$	0,972	0,972	0,966	0,956	0,952	0,951	0,899	0,890	0,875	0,856	0,845	0,837
	$\varphi_e^* \cdot \varphi_B / \varphi_{e,d}$ $\varphi_e^* \cdot \varphi_V / \varphi_{e,d}$	0,982	0,983	0,989	0,998	1,000	0,999	0,941	0,953	0,968	0,985	0,991	0,992
3,0	$\varphi_{e,d}$	543	452	349	247	159	096	527	429	325	226	143	085
	$\varphi_{e,d}/\varphi_e$	0,996	0,994	0,981	0,969	0,966	0,960	0,966	0,943	0,912	0,885	0,869	0,851
	$\varphi_e^* \cdot \varphi_B / \varphi_{e,d}$ $\varphi_e^* \cdot \varphi_V / \varphi_{e,d}$	0,970	0,971	0,981	0,990	0,990	0,992	0,910	0,929	0,952	0,971	0,979	0,986
4,0	$\varphi_{e,d}$	414	357	287	212	143	090	418	350	273	197	130	081
	$\varphi_{e,d}/\varphi_e$	0,982	0,999	0,995	0,984	0,984	0,969	0,992	0,980	0,949	0,917	0,898	0,867
	$\varphi_e^* \cdot \varphi_B / \varphi_{e,d}$ $\varphi_e^* \cdot \varphi_V / \varphi_{e,d}$	0,995	0,976	0,977	0,982	0,977	0,986	0,921	0,927	0,945	0,962	0,967	0,979
5,0	$\varphi_{e,d}$	307	275	230	178	126	—	315	275	224	169	116	—
	$\varphi_{e,d}/\varphi_e$	0,975	0,991	1,001	1,001	0,991	—	1,001	0,992	0,974	0,949	0,916	—
	$\varphi_e^* \cdot \varphi_B / \varphi_{e,d}$ $\varphi_e^* \cdot \varphi_V / \varphi_{e,d}$	1,016	0,993	0,978	0,973	0,975	—	0,953	0,943	0,945	0,953	0,960	—

Примечание: Значения коэффициентов $\varphi_{e,d}$ увеличены в 1000 раз.

Note: The values of the coefficients $\varphi_{e,d}$ are increased by 1,000 times.

Таким образом, проверку общей устойчивости с учетом обеспечения устойчивости ветви можно выполнить по традиционной формуле с заменой φ_e на $\varphi_{e,d}$:

$$\frac{N}{\varphi_{e,d} A R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (9)$$

где $\varphi_{e,d}$ определяется:

- по выражению (8) при $\varphi_{e,d} < \varphi_e$;
- $\varphi_{e,d} = \varphi_e$ при $\varphi_{e,d} > \varphi_e$.

Расчет на устойчивость ветвей из плоскости решетки при действии переменной продольной силы

Продольные усилия в ветвях решетчатых элементов, выделенных по расчетной длине из плоскости решетки, представим в виде:

$$N_B(z) = N_B^0 + q_{z,B}^0 \bar{z}, \quad (10)$$

где $N_B^0 = N_{B,\min}$ — меньшее из двух значений продольной силы в наиболее напряженной ветви $N_B(0)$ и $N_B(l)$, определяемых по соответствующим комбинациям усилий $M(0)$, $N(0)$ и $M(l)$, $N(l)$, действующих на концах решетчатого стержня; $q_{z,B}^0 = (N_{B,\max} - N_{B,\min})l^{-1}$ — равномерно распределенная вдоль оси нагрузка.

Решение задачи устойчивости будем проводить численно-аналитическим методом [23, 24], который основан на частных решениях задач недеформированного расчета и бифуркационных задач устойчивости. Развитие пластических деформаций компенсируется дополнительным нагружением фиктивными нагрузками.

Учитывая изложенное, рассмотрим фактическое нагружение ветви продольной силой $N_B^0 = \text{const}$, действующей с различными концевыми эксцентриситетами e_{y1}^0 и e_{y2}^0 (см. рис. 1), в сочетании с равномерно распределенной осевой нагрузкой $q_{z,B}^0 = \text{const}$.

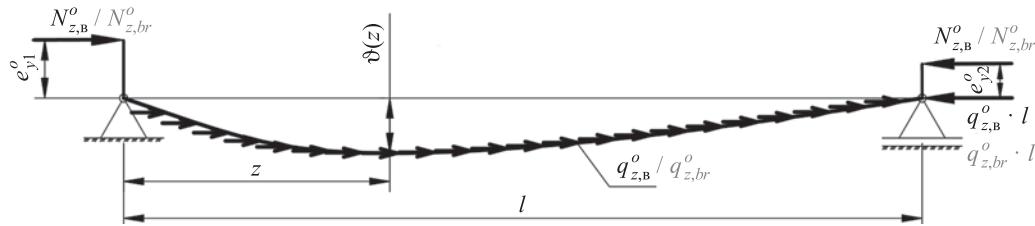


Рис. 1. Расчетная модель ветви в плоскости перпендикулярной решетки

Fig. 1. Calculation model of a branch in the plane of a perpendicular lattice

Дифференциальные уравнения равновесия ветви, расчетная модель которой представлена на рис. 1, имеют вид [23]:

$$EI_{x,B} \vartheta^{IV} + N_B \vartheta^{II} + q_B (\vartheta^I + z \vartheta^{II}) = 0. \quad (11)$$

Решение деформационной задачи, описанной уравнением (11) (для упрощения выражений принято $N_B = N_B^0$, $q_B = q_{z,B}^0$), будем искать в виде комбинации частных решений [24]:

$$\vartheta(\bar{z}) = \vartheta_H(\bar{z}) + \vartheta_{y1}(\bar{z}) + \vartheta_{y2}(\bar{z}), \quad (12)$$

где $\vartheta_H(\bar{z}) = V_H \cdot \psi_H(\bar{z})$; $V_H = \frac{N_B l^2}{6EI_{x,B}} e_{y1}^0$.

Решение задачи по недеформированной расчетной схеме:

$$\psi_H(\bar{z}) = (2 + n_e) \bar{z} - 3 \bar{z}^2 + (1 - n_e) \bar{z}^3, \quad (13)$$

где $n_e = e_{y2}^0 / e_{y1}^0$; $\bar{z} = z/l$.

Функции потери устойчивости:

$$\vartheta_{y1} = V_{y1} \cdot \psi_{y1}(\bar{z}); \vartheta_{y2} = V_{y2} \cdot \psi_{y2}(\bar{z}), \quad (14)$$

где $\psi_{y1}(\bar{z}) = \sin \pi \bar{z}$, $\psi_{y2}(\bar{z}) = \sin 2\pi \bar{z}$ — формы потери устойчивости ветви, нагруженной $N_B(z) = N_B + q_B \bar{z}$; V_{y1} , V_{y2} — некоторые неизвестные константы, имеющие размерность перемещений, с точностью до которых решаются бифуркационные задачи устойчивости.

Для определения последних в выражение (11) подставим общее решение (12), в результате чего получим:

$$L = EI_{x,B} (\vartheta_{y1}^{IV} + \vartheta_{y2}^{IV}) + N_B \vartheta^{II} + q_B (\vartheta^I + z \vartheta^{II}) = 0. \quad (15)$$

Уравнение (15) фактически описывает задачу устойчивости при нагружении ветви только $N_B(\bar{z})$, ($e_{y1}^0 = e_{y2}^0 = 0$), имеющей начальные искривления оси $\vartheta_H(z)$ по формуле (13). Тогда, применив процедуру метода Бубнова – Галеркина

$$\begin{aligned} \int_0^1 L \cdot \sin \pi \bar{z} d\bar{z} &= 0; \\ \int_0^1 L \cdot \sin 2\pi \bar{z} d\bar{z} &= 0, \end{aligned} \quad (16)$$

получим систему двух алгебраических уравнений, из которых определяем:

$$V_{y1} = V_H \eta_1; V_{y2} = V_H \eta_2, \quad (17)$$

$$\eta_1 = \frac{\Phi_B \bar{\lambda}_{XB}^2}{\pi^5} [K_2 K_3 - 16 K_1 (1 - 0,25 K_4)] / \Delta; \quad (18)$$

$$\eta_2 = \frac{\Phi_B \bar{\lambda}_{XB}^2}{\pi^5} [K_1 K_3 - K_2 (1 - K_4)] / \Delta,$$

где $K_1 = 12(1 + n_e) + n_g(5,3 + 6,7 n_e)$;

$K_2 = 6(1 - n_e) - 3 n_g(1 + 3 n_e)$; $K_3 = \frac{\Phi_B \bar{\lambda}_{XB}^2}{\pi^2} \cdot 0,45 n_g$;

$K_4 = \frac{\Phi_B \bar{\lambda}_{XB}^2}{\pi^2} (1 + 0,5 n_g)$; $n_g = q_B l / N_B$;

$$\Delta = \tilde{\Phi}_{B,cr1} \cdot \tilde{\Phi}_{B,cr2} \left(1 - \frac{\Phi_B \bar{\lambda}_{XB}^2}{\tilde{\Phi}_{B,cr1}} \right) \cdot \left(1 - \frac{\Phi_B \bar{\lambda}_{XB}^2}{\tilde{\Phi}_{B,cr2}} \right);$$

$$\tilde{\Phi}_{B,cr1,2} = \frac{b_2 \pm \sqrt{b_2^2 - 4 a_2 c_2}}{2 a_2}; \quad a_2 = \frac{4}{\pi^4} (1 + n_g + 0,2 n_g^2);$$

$$b_2 = \frac{20}{\pi^2} (1 + 0,5 n_g); \quad c_2 = 16; \quad \Phi_{B,cr1,2} \cdot \bar{\lambda}_{XB}^2 = \tilde{\Phi}_{B,cr1,2} —$$

критические параметры силы N_B в сочетании с действием q_B ; $\Phi_B = N_B / R_y A_B$; $\bar{\lambda}_{XB} = \lambda_{XB} \sqrt{R_y / E}$ — условная гибкость ветви ($\lambda_{XB} = l_{ef,XB} / i_{XB}$).

Заметим, что значения критического параметра $\tilde{\Phi}_{B,cr1}$ полностью совпадают с результатами, полученными С.П. Тимошенко [23], что подтверждает правильность выбора функций потери устойчивости (14).

Учитывая выражение (17), общее решение (12) представим в виде:

$$\vartheta(z) = e_{y1}^0 \frac{\Phi_B \bar{\lambda}_{XB}^2}{6} \left[(2 + n_e) \bar{z} - 3 \bar{z}^2 + (1 - n_e) \bar{z}^3 + \eta_1 \sin \pi \bar{z} + \eta_2 \sin 2\pi \bar{z} \right], \quad (19)$$

тогда

$$M_{XB}(\bar{z}) = N_B e_{y1}^0 \left[1 - (1 - n_e) \bar{z} + \frac{\pi^2}{6} \times \times (\eta_1 \sin \pi \bar{z} + 4 \eta_2 \sin 2\pi \bar{z}) \right]. \quad (20)$$

Последнее позволяет определить максимальные значения напряжений в наиболее нагруженном сечении $\bar{z} = \bar{z}_*$.

$$\bar{\sigma}_{\max}(\bar{z}_*) = \varphi_{\text{в}} \left[n_g \bar{z}_* + 1 + m_{x1}^o \left(1 - (1 - n_e) \bar{z}_* + \frac{\pi^2}{6} (\eta_1 \sin \pi \bar{z}_* + 4 \eta_2 \sin 2\pi \bar{z}_*) \right) \right], \quad (21)$$

где $m_{x1}^o = e_{y1}^o / \rho_x$ — относительный эксцентриситет; $\rho_x = W_{x\text{в}} / A_{\text{в}}$.

Координата $\bar{z}_*$ устанавливается по $d\bar{\sigma}_{\max}(\bar{z})/d(\bar{z}) = 0$, в результате решение соответствующего уравнения:

$$n_g - m_{x1}^o (1 - n_e) + m_{x1}^o \frac{\pi^3}{6} \left(\eta_1 \cos \pi \bar{z} + 8 \eta_2 \cos 2\pi \bar{z} \right) = 0. \quad (22)$$

При упругой работе материала решение задачи устойчивости ветви (определение коэффициента $\varphi_{\text{в}}$) можно получить при $\bar{\sigma}_{\max}(\bar{z}_*) = 1$:

$$\varphi_{\text{в}} (n_g \bar{z}_* + 1 + m_{x1}^o K_{dx}) = 1, \quad (23)$$

где K_{dx} — деформационный коэффициент, учитывающий влияние перемещений (19) на изгибные усилия:

$$K_{dx} = 1 - (1 - n_e) \bar{z}_* + \frac{\pi^2}{6} (\eta_1 \sin \pi \bar{z}_* + 4 \eta_2 \sin 2\pi \bar{z}_*). \quad (24)$$

Исследование устойчивости за пределом упругости проведем обратным численно-аналитическим методом [22]: по НДС в наиболее нагруженном сечении (в нашем случае при $\bar{z} = \bar{z}_*$) неограниченно упругого стержня, являющегося результатом действия заданных деформационных усилий, численно определяются действующие и фиктивные, компенсирующие развитие пластических деформаций, усилия. Затем обратным аналитическим решением деформационной задачи устанавливаем фактическое нагружение стержня на его концах.

Устойчивость, как известно, определяется при переходе из равновесного в неравновесное состояние стержня, поэтому обратное решение деформационной задачи, в зависимости от гибкости стержня, следует проводить при ряде значений максимальных деформаций наиболее напряженного волокна в указанном сечении $\bar{\epsilon}_{\max,i} = \epsilon_{\max} E / R_y$ ($0,8 \leq \bar{\epsilon}_{\max,i} \leq 4$) с целью поиска наибольшего параметра нагружения $\varphi_{\max}$ — коэффициента потери устойчивости.

Следуя исследованию [22], рассмотрим нагружение неограниченно упругой ветви (рис. 1) в сечении $\bar{z} = \bar{z}_*$ продольной силой $N_{\text{в},i}^* (n_g \bar{z}_* + 1)$ с деформационным моментом $M_{\text{в},i}^* (\bar{z}_*)$ (рис. 2), которое для обобщения решения представим безразмерными параметрами $\varphi_{\text{в},i}^* (n_g \bar{z}_* + 1)$ и $\varphi_{\text{в},i}^* \cdot m_{x1}^*$. Тогда соответствующее им НДС примет вид:

$$\bar{\sigma}_i(\bar{y}_k) = \bar{\epsilon}_i(\bar{y}_k) = \varphi_{\text{в},i}^* (n_g \bar{z}_* + 1 + m_{x1}^* \bar{y}_k), \quad (25)$$

$$\varphi_{\text{в},i}^* = \bar{\epsilon}_{\max,i} (n_g \bar{z}_* + 1 + m_{x1}^*)^{-1}, \quad (26)$$

где $\bar{y}_k = y_k / y_*$; y_* — координата наиболее напряженного волокна.

Для определения фактически действующих и фиктивных усилий, соответствующих деформированному состоянию (25), разобьем сечение (на при-

мере двутаврового) по n достаточно малых дискретных площадок ΔA_k с координатами центра тяжести y_k (рис. 2). Гипотеза плоских сечений в параметрах, соответствующих унифицированной диаграмме работы стали (рис. 3), примет вид:

$$\bar{\epsilon}_k = \bar{\epsilon}_o - \bar{\vartheta}^{\text{II}} \bar{y}_k, \quad (27)$$

где $\bar{\epsilon}_o = \epsilon_o E / R_y$; $\bar{\vartheta}^{\text{II}} = \vartheta^{\text{II}} \rho_x E / R_y$; $\bar{y}_k = y_k / \rho_x$; ϵ_o — относительная деформация оси ветви; ϑ^{II} — кривизна при изгибе относительно оси x .

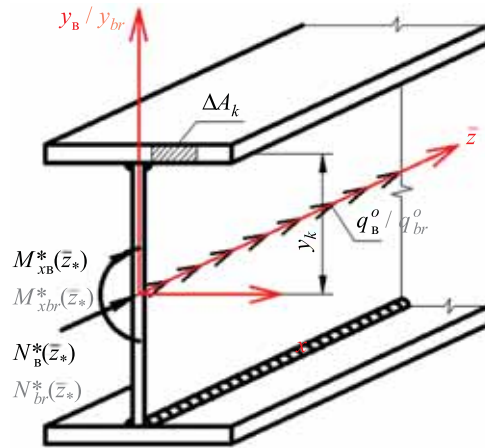


Рис. 2. Нагружение ветви в сечении $\bar{z} = \bar{z}_*$

Fig. 2. Loading the branch in the section $\bar{z} = \bar{z}_*$

Деформационные характеристики сечения ϵ_o и ϑ^{II} , согласно формуле (25), заменим на соответствующие им параметры нагружения:

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon}_o &= \varphi_{\text{в},i}^* (n_g \bar{z}_* + 1); \\ \bar{\vartheta}^{\text{II}} &= -\varphi_{\text{в},i}^* m_{x1}^* \frac{\rho_x}{y_*}. \end{aligned} \quad (28)$$

Тогда, используя формулу (27) и физические зависимости $\bar{\sigma}_k = \bar{E}_{ck} \cdot \bar{\epsilon}_k$ по унифицированной диаграмме $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$ (рис. 3), определяем параметры нагружения продольной силой и деформационным моментом:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{в},i} &= \varphi_{\text{в},i}^* \left[(n_g \bar{z}_* + 1) \bar{A}_{ef} - m_{x1}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{y}_c \right]; \\ \varphi_{\text{в},i} \cdot m_{x1,i} &= \varphi_{\text{в},i}^* \left[-(n_g \bar{z}_* + 1) \bar{y}_c + m_{x1}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{i}_{x,ef}^2 \right], \end{aligned} \quad (29)$$

где $\bar{A}_{ef} = \sum_{k=1}^n \bar{E}_{ck} \cdot \Delta \bar{A}_k$; $\bar{y}_c = \sum_{k=1}^n \bar{E}_{ck} \cdot \bar{y}_k \cdot \Delta \bar{A}_k$; $\bar{i}_{x,ef}^2 = \sum_{k=1}^n \bar{E}_{ck} \cdot \bar{y}_k^2 \cdot \Delta \bar{A}_k$; $\bar{E}_{ck} = \text{tg } \alpha_k$ — относительный секущий модуль (рис. 3).

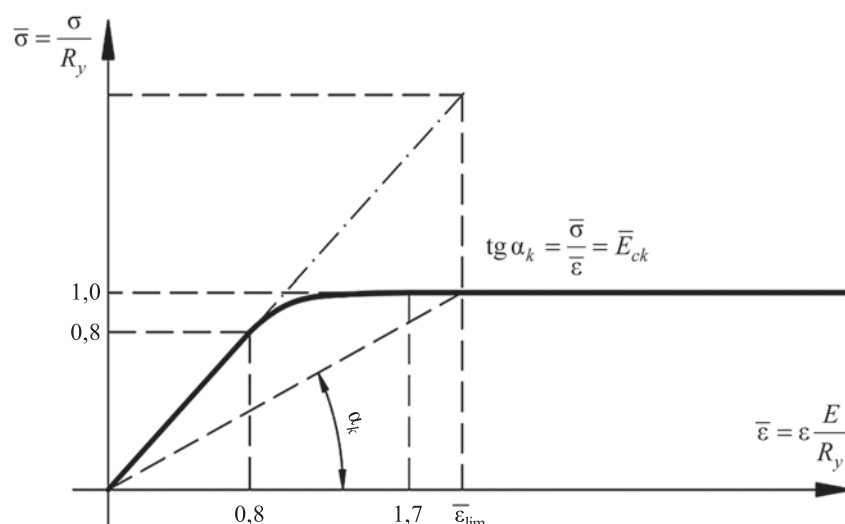


Рис. 3. Унифицированная диаграмма работы стали

Fig. 3. Unified steel work diagram

Параметры фиктивных усилий соответственно устанавливаются:

$$\varphi_{B,\Phi i} = \varphi_{B,i}^* \left[(n_g \bar{z}_* + 1) \bar{A}_{осл} + m_{x1}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{y}_c \right]; \quad (30)$$

$$m_{x1,\Phi i} = \frac{(n_g \bar{z}_* + 1) \bar{y}_c + m_{x1}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{y}_c^2}{(n_g \bar{z}_* + 1) \bar{A}_{осл} + m_{x1}^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{y}_c}, \quad (31)$$

$$\text{где } \bar{A}_{осл} = 1 - \bar{A}_{ef}; \quad \bar{y}_{x,oc}^2 = \frac{I_{xb}}{\rho_x^2 A_B} - \bar{y}_{x,ef}^2.$$

Используя выражение (29), можно определить продольную силу $N_{B,i} = \varphi_{B,i} \cdot A_B R_y$, действующую совместно с распределенной осевой нагрузкой $q_{B,i} = n_B \cdot N_{B,i} / l$. При этом фиктивную силу с параметром $\varphi_{B,\Phi i}$ по формуле (30) примем постоянной по длине ветви, тогда относительный ее эксцентриситет на опоре ($\bar{z} = 0$) $m_{x1,\Phi i}$ будет определяться по выражению (31).

Анализируя изложенное, можно заметить, что неизвестным остается только параметр концевых относительных эксцентриситетов $m_{x1,i}^o$. Для его установления рассмотрим НДС в наиболее нагруженном сечении при совместном действии $N_{B,i}$ и $N_{B,\Phi i}$, которое согласно работе [22] примет вид:

$$\bar{\sigma}^*(\bar{y}) = \varphi_{B,i} (n_g \bar{z}_* + 1 + m_{x1,i}^o \bar{y} K_{d,xi}) + \varphi_{B,\Phi i} (n_g \bar{z}_* + 1 + m_{x1,\Phi i}^o \bar{y} K_{d,xi}), \quad (32)$$

где $K_{d,xi}$ — коэффициент, учитывающий влияние перемещений на усилия.

$$K_{d,xi} = 1 - (1 - n_e) \bar{z}_* + \frac{\pi^2}{6} \times (\eta_{1,i} \sin \pi \bar{z}_* + 4 \eta_{2,i} \sin 2\pi \bar{z}_*), \quad (33)$$

где $\eta_{1,i}$ и $\eta_{2,i}$ — коэффициент определяется по формуле (18).

Тогда при $\bar{\sigma}_{\max,i}^* = \bar{\varepsilon}_{\max,i}^*$ получим:

$$m_{x1,i}^o = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max,i}^* - \varphi_{B,i}^* n_g \bar{z}_*}{\varphi_{B,i} K_{d,xi}} - \left[\frac{\varphi_{B,\Phi i}}{\varphi_{B,i}} \left(\frac{1}{K_{d,xi}} + m_{x1,\Phi i}^o \right) + \frac{1}{K_{d,xi}} \right]. \quad (34)$$

Таким образом, по назначенному i -му НДС по $\bar{\varepsilon}_{\max,i}^* = 1 + \Delta \bar{\varepsilon}_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$) $\Delta \bar{\varepsilon}_i = 3,2/n$ с заданным параметром деформационных относительных эксцентриситетов m_{x1}^* обратным численно-аналитическим методом расчета можно определить соответствующее нагружение ветви с параметрами $\varphi_{B,i}$ и $m_{x1,i}^o$. Рассматривая НДС при ряде значений $\bar{\varepsilon}_{\max,i}^*$ ($i = 1, 2, \dots, n$), когда $m_{x1,i}^o = \text{const}$, определяем наибольший параметр общего нагружения $\varphi_{\max}$, который будет соответствовать коэффициенту потери устойчивости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложено аналитическое решение задачи общей устойчивости решетчатых элементов с учетом обеспечения устойчивости наиболее напряженной ветви. При этом в последней можно учитывать влияние расцентровки узлов решетки, а также местных дефектов и повреждений ветвей, что является весьма важным при оценке технического состояния эксплуатируемых конструкций.

На основании численно-аналитического метода разработано решение задачи устойчивости ветви из плоскости решетки при фактическом ее нагружении продольной силой с различными значениями концевых эксцентриситетов в сочетании с равномерной распределенной осевой нагрузкой. Используемый

метод решения, как это было показано на примерах расчета трубобетонных и легких стальных тонкостенных элементов конструкций [25, 26], обладает достаточной для практики применения точностью и позволяет сократить время расчета на не-

сколько порядков по сравнению с существующими методами.

В практическом применении разработанный метод дает возможность вскрыть определенные резервы устойчивости ветвей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тимошенко С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек. М. : Наука, 1971. 807 с.
2. Броуде Б.М. Об устойчивости составных стержней с планками // Строительная механика и расчет сооружений. 1966. № 6. С. 24–26.
3. Трофимов В.И. Исследование работы решетчатой мачты типа опоры линии электропередач прямоугольного сечения на действие крутящего момента // Труды института ЦНИИПСК. 1961. № 5. С. 44–60.
4. Стрелецкий Н.С. Материалы к курсу стальных конструкций. Вып. 2. Ч. 1: Работа сжатых стоек. М. : Госстройиздат, 1959. 284 с.
5. Ржаницин А.Р. Расчет составных стержней в состоянии предельного равновесия // Строительная механика и расчет сооружений. 1967. № 5. С. 27–30.
6. Бельский Г.Е. К расчету трехгранных составных стержней на планках // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 1981. № 1. С. 14–19.
7. Трофимов В.И. Исследования устойчивости трехгранных сквозных стержней // Исследования по стальным конструкциям. 1962. № 13. С. 173–199.
8. Кондрахов Е.И. Экспериментальные исследования на центральное сжатие трехгранных стержней из сплавов Д1-Т с соединениями на черных болтах // Строительные конструкции из алюминиевых сплавов. 1963. № 2. С. 203–2013.
9. Горев В.В. Устойчивость центрально сжатых составных стержней при упругой работе // Исследования по строительным конструкциям. 1964. С. 71–82.
10. Трофимов В.И. Исследование и расчет элементов стальных опор линий электропередач. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1959. 103 с.
11. Трофимов В.И. О расчете на устойчивость составного четырехгранного стержня на планках // Строительная механика и расчет сооружений. 1963. № 2. С. 41–44.
12. Незальзов О.Р., Ковтун-Горбачева Т.А. Определение приведенной гибкости безраскосных колонн из гнутосварных прямоугольных труб // Металлические конструкции и испытания сооружений : межвузовский тематический сб. тр. 1979. С. 137–142.
13. Попов Н.Г. Об устойчивости плоских симметричных многоэтажных рам // Строительство: науч. докл. высшей школы. 1959. № 2. С. 79–91.
14. Степанов Б.П. Некоторые вопросы теории расчета регулярных ферм, рам и систем со сквозными элементами : дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 1976. 156 с.
15. Gzawford R.F., Benton M.D. Strength of initially wavy lattice columns // AIAA Journal. 1980. Vol. 18. Issue 5. Pp. 581–584. DOI: 10.2514/3.50789
16. Grochowski I. O obliczaniu napezen dzu-gorzonych wielogaleziowych pretach Kratowych // Inz. i bud. 1980. Vol. 35. Issue 4. Pp. 134–137.
17. Holla V.K., Prathap O., Varadan T.K. Effect of shear deformation on post-buckling behaviour of columns // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1980. Vol. 15. Issue 2. Pp. 302–307. DOI: 10.1002/nme.1620150213
18. Ramm W., Uhlmann W. Zur Anpassung des Stabilitätsnach-weises für mehzteilige Druckstäbe an das europäische Nachweiskonzept // Stahlbau. 1981. No. 6. Pp. 161–172.
19. Горев В.В. Разработка общей методики статического расчета сжатых решетчатых металлических конструкций и совершенствование их конструктивной формы : дис. ... док. техн. наук. Липецк, 1985. 403 с.
20. Горев В.В. Влияние двухосного эксцентриситета на работу сквозных стержней // Строительная механика и расчет сооружений. 1978. № 4. С. 30–33.
21. Горев В.В. Общая устойчивость сжатых сквозных стержней // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. 1983. № 1. С. 39–40.
22. Белый Г.И. «Обратный» метод расчета усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций путем увеличения сечения // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 46–55. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-46-55
23. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем / пер. с англ. И.К. Снитко. 2-е изд. М. : Гостехиздат, 1955. 568 с.
24. Белый Г.И. О расчете упругих стержней по деформированной схеме при действии активных и параметрических нагрузок // Механика стержневых систем и сплошных сред. 1980. С. 41–48.
25. Белый Г.И., Смирнов М.О. Обратный численно-аналитический метод расчета легких стальных тонкостенных стержневых элементов // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 3. С. 57–68. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.03.57-68
26. Белый Г.И., Ведерникова А.А. Исследование прочности и устойчивости трубобетонных элементов конструкций обратным численно-аналитическим методом // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 26–35. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-2-26-35

Поступила в редакцию 12 августа 2022 г.

Принята в доработанном виде 28 сентября 2022 г.

Одобрена для публикации 4 октября 2022 г.

О Б АВТОРЕ: Григорий Иванович Белый — доктор технических наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; РИНЦ ID: 272945; office@erkon.ru.

REFERENCES

1. Timoshenko S.P. *Stability of rods, plates and shells*. Moscow, Nauka Publ., 1971; 807. (rus.).
2. Brode B.M. On the stability of composite rods with slats. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 1966; 6:24-26. (rus.).
3. Trofimov V.I. Investigation of the operation of a lattice mast of the type of support of a rectangular power line on the action of torque. *Proceedings of the TsNIIPSK Institute*. 1961; 5:44-60. (rus.).
4. Streletsky N.S. *Materials for the course of steel structures. Issue 2. Part 1. Work of compressed racks*. Moscow, Gosstroyizdat, 1959; 284. (rus.).
5. Rzhantitsin A.R. Calculation of composite rods in the state of ultimate equilibrium. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 1967; 5:27-30. (rus.).
6. Belsky G.E. To the calculation of triangular composite rods on slats. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1981; 1: 14-19. (rus.).
7. Trofimov V.I. Stability study of triangular through rods. *Research on Steel Structures*. 1962; 13:173-199. (rus.).
8. Kondrakhov E.I. Experimental studies on the central compression of triangular rods made of D1-T alloys with connections on black bolts. *Building Structures Made of Aluminum Alloys*. 1963; 2:203-2013. (rus.).
9. Gorev V.V. Stability of centrally compressed composite rods during elastic operation. *Research on Building Structures*. 1964; 71-82. (rus.).
10. Trofimov V.I. *Research and calculation of elements of steel poles of power transmission lines*. Moscow ; Leningrad, State Energy Publishing House, 1959; 103. (rus.).
11. Trofimov V.I. On the calculation of the stability of a composite tetrahedral rod on the slats. *Construction Mechanics and Calculation of Structures*. 1963; 2: 41-44. (rus.).
12. Nezalov O.R., Kovtun-Gorbacheva T.A. Determination of reduced flexibility of bevel-free columns from bent-welded rectangular pipes. *Metal structures and tests of structures : Interuniversity thematic collection of works*. 1979; 137-142. (rus.).
13. Popov N.G. On the stability of flat symmetrical multi-storey frames. *Construction: Scientific Report of the Higher School*. 1959; 2:79-91. (rus.).
14. Stepanov B.P. *Some questions of the theory of calculation of regular farms, frames and systems with through elements : dissertation ... candidate of technical sciences*. Saratov, 1976; 156. (rus.).
15. Gzawford R.F., Benton M.D. Strength of initially wavy lattice columns. *AIAA Journal*. 1980; 18(5):581-584. DOI: 10.2514/3.50789
16. Grochowski I. O obliczaniu napezen dzu-gorzednych wielogaleziowych pretach Kratowych. *Inz. i bud.* 1980; 35(4):134-137.
17. Holla V.K., Prathap O., Varadan T.K. Effect of shear deformation on post-buckling behaviour of columns. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1980; 15(2):302-307. DOI: 10.1002/nme.1620150213
18. Ramm W., Uhlmann W. Zur Anpassung des Stabilitätsnach-weises für mehzteilige Druckstäbe an das europäische Nachweiskonzept. *Stahlbau*. 1981; 6: 161-172.
19. Gorev V.V. *Development of a general methodology for static calculation of compressed lattice metal structures and improvement of their constructive form : dissertation ... doctor of technical sciences*. Lipetsk, 1985; 403. (rus.).
20. Gorev V.V. The influence of biaxial eccentricity on the operation of through rods. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 1978; 4:30-33. (rus.).
21. Gorev V.V. General stability of compressed through rods. *News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture*. 1983; 1:39-40. (rus.).
22. Belyy G.I. "Reverse" method of calculating steel structure rod elements reinforced under load by increasing cross sections. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 6(83):46-55. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-6-46-55 (rus.).
23. Timoshenko S.P. *Stability of elastic systems / Translated from English*. I.K. Snitko. 2nd ed. Moscow, Gostekhizdat, 1955; 568. (rus.).
24. Bely G.I. On the calculation of elastic rods according to the deformed scheme under the action of

active and parametric loads. *Mechanics of Rod Systems and Continuous Media*. 1980; 41-48. (rus.).

25. Belyi G.I., Smirnov M.O. Inverse numerical-analytical method for calculation of light steel thin-walled rod elements. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 3:57-68. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.03.57-68 (rus.).

26. Belyy G.I., Vedernikova A.A. The inverse numerical-analytical method for studying the strength and stability of concrete-filled steel tube structural members. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021; 2(85): 26-35. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-2-26-35 (rus.).

Received August 12, 2022.

Adopted in revised form on September 28, 2022.

Approved for publication on October 4, 2022.

B I O N O T E S : **Grigory I. Belyi** — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RISC: 272945; office@erkon.ru.

Стойкость асфальтобетонов в условиях воздействия биосреды

Владимир Трофимович Ерофеев, Майя Алексеевна Ликомаскина,

Виктор Васильевич Афонин, Анжелика Игоревна Архипова

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
(МГУ им. Н.П. Огарева); г. Саранск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель исследования — изучение микробиологической стойкости асфальтобетонов различного типа; обосновать и выбрать методы оценки биостойкости асфальтобетонов в среде мицелиальных грибов.

Материалы и методы. Образцы исследуемых асфальтобетонов содержали компоненты: битум марки БНД 60/90 со следующими характеристиками: глубина проникания иглы 0,1 мм при 25 °С — 85; глубина проникания иглы 0,1 мм при 0 °С — 35; температура размягчения по кольцу и шару 0 °С — 48; растяжимость — 83 см; индекс пенетрации — 0,6. В качестве наполнителей использовались минеральный порошок, порошок на основе стеклобоя, пищевая мука. Применялся также неактивированный минеральный порошок марки МП-1 из карбонатных пород с истинной и средней плотностью, соответственно 2,71 и 1,71 г/см³. Стеклопорошок получали измельчением отходов стекла ОАО «Лисма» (г. Саранск). Химический состав отходов производства стекла включал (в % по массе): SiO₂ — 68,75–72,90; Na₂O — 11,9–16,7; K₂O — 1,2–3,8; CaO — 5,0–6,0; BaO — 2,2–5,5; MgO — 3,2–3,8; Fe₂SO₄ — 0,1–0,12; Al₂O₃ — 1,0–1,5. Пищевая мука рассматривалась как добавка, являющаяся питательной средой для мицелиальных грибов. Приведены еще некоторые компоненты, которые добавлялись в исследуемые образцы асфальтобетонов. Определение контролируемого свойства твердости проводилось с использованием консистометра Гепплера.

Результаты. На основе проведенных исследований и предложенных способов контроля изменения твердости определены наиболее предпочтительные составы относительно их стойкости к воздействию мицелиальных грибов. По каждой исследуемой группе образцов и составов асфальтобетонов приводится их ранжирование по степени стойкости к воздействию внешней среды — мицелиальных грибов.

Выводы. Полученные результаты позволяют оценить качество асфальтобетонных составов при их экспонировании в биосреде. Предложенный подход оценки качества асфальтобетонных составов может быть распространен на другие строительные материалы и изделия, подверженные определенным агрессивным воздействиям.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асфальтобетон, физико-механические свойства, прочность, твердость, мицелиальные грибы, стойкость, среднеквадратическая ошибка, интерполяция, прямая

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ерофеев В.Т., Ликомаскина М.А., Афонин В.В., Архипова А.И. Стойкость асфальтобетонов в условиях воздействия биосреды // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 10. С. 1358–1371. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1358-1371

Автор, ответственный за переписку: Майя Алексеевна Ликомаскина, chakichevama@list.ru.

A study on resistance of asphalt concrete exposed to the effect of mycelial fungi

Vladimir T. Erofeev, Maya A. Likomaskina, Viktor V. Afonin, Anzhelika I. Arkhipova
Ogarev Mordovia State University; Saransk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In recent years, the issue of improving the quality and service life of road surfaces has been relevant in Russian and worldwide. The main reasons for the early destruction of road surfaces is the quality of individual components and the imperfect composition of asphalt concrete that has pre-set durability. The results of studies, characterizing changes in the roadway surface properties, are of practical value. In this case, we consider the surface hardness of asphalt concrete specimens of various types, subjected to microbiological destruction, which is the property to be studied. The purpose of the work is to study the microbiological resistance of various asphalt concretes, to select and substantiate methods for assessing the biological stability of asphalt concrete subjected to mycelial fungi.

Materials and methods. Asphalt concrete specimens contain BND 60/90 bitumen that has the following characteristics: needle penetration depth 0.1 mm at 25 °C — 85; needle penetration depth 0.1 mm at 0 °C — 35; ring and ball softening point 0 °C — 48; extensibility — 83 cm; penetration index — 0.6. Mineral powder, glass cullet powder, and food flour are used as fillers. MP-1 inactivated mineral filler, made of carbonate rock, having the true and average density of 2.71 and 1.71 g/cm³, respectively, was also used. Glass powder was obtained by grinding the waste glass of JSC "Lisma", Saransk. The chemical composition of glass waste is (in percent for weight): SiO₂ — 68.75–72.90; Na₂O — 11.9–16.7; K₂O — 1.2–3.8; CaO — 5.0–6.0; BaO — 2.2–5.5; MgO — 3.2–3.8; Fe₂SO₄ — 0.1–0.12; Al₂O₃ — 1.0–1.5. Food flour was

considered as an additive that serves as the nutritional medium for mycelial fungi. Some other components, added to the studied specimens of asphalt concrete, are discussed in the work. The studied property, or hardness, was identified using the Hoppler consistometer. Testing results are provided in the paper. Linear interpolation of experimental data was conducted to identify hardness at the intermediate points to rank the tested asphalt concrete, the standard error between the hardness curve during the exposure and the straight line for the same exposure points. The results of the proposed method are explained graphically using the experimental data. It is assumed that the smaller the root-mean-square error, the more resistant the corresponding composition of asphalt concrete to the effect of mycelial fungi.

Results. As a result of the studies and the application of the proposed hardness control methods, the best compositions were identified in terms of resistance to the effects of mycelial fungi. Each group of specimens and compositions of asphalt concrete under study was broken down by their resistance to the effects of the external environment, or mycelial fungi.

Conclusions. The results of this research project enable the authors to evaluate the quality of asphalt concrete compositions exposed to the biological environment. The proposed approach to assessing the quality of asphalt concrete compositions can be applied to other building materials and products subjected to certain aggressive media.

KEYWORDS: asphalt concrete, physical and mechanical properties, strength, hardness, mycelial fungi, durability, root-mean-square error, interpolation, straight line

FOR CITATION: Erofeev V.T., Likomaskina M.A., Afonin V.V., Arkhipova A.I. A study on resistance of asphalt concrete exposed to the effect of mycelial fungi. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(10):1358-1371. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1358-1371 (rus.).

Corresponding author: Maya A. Likomaskina, chakichevama@list.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение долговечности строительных материалов, в том числе асфальтобетонов, является одной из актуальных задач, решение которой обеспечивает значительный экономический эффект за счет сокращения затрат на проведение ремонтных работ в процессе эксплуатации и улучшения транспортно-эксплуатационного состояния дорожных покрытий в течение их срока службы [1–3].

Расширение производства и применения асфальтобетона в дорожных покрытиях ставит перед исследователями ряд вопросов, из которых центральное место занимает проблема, связанная с повышением качества и долговечности этого материала.

Известно, что в южных районах России климатические условия способствуют ускорению процессов старения. В свою очередь старение материала создает благоприятные условия для микробиологического разрушения¹ [4–7]. В некоторых литературных источниках содержатся результаты исследования микробиологической коррозии цементных [8–10], полимерных [11] серых и других бетонов [12–17].

К настоящему времени недостаточно изученными остаются проблемы воздействия микроскопических организмов на асфальтобетоны и другие битумные композиты. Основная роль в биоразрушениях строительных и других материалов отводится бактериям и мицелиальным грибам [7], воздействие которых на поведение асфальтобетонных составов практически не изучено. Жизнедеятельность микроскопических грибов и бактерий на строительных

материалах, в том числе на асфальтобетоне, обусловлена свойством микроорганизмов к разнообразным условиям существования и возможностью использовать различные вещества в качестве источников питания. Отрицательная роль микроорганизмов усиливается при наличии внешних загрязнений. Грибы и бактерии широко распространены в природе: возле свалок контейнеров с бытовым мусором, на территории мясных рынков и мясокомбинатов, вблизи животноводческих ферм, в почве и т.д. [15–17]. Разрушительное действие грибов на материалы зависит не только от степени их обрастания мицелием, но и от состава их метаболитов — гидролитических ферментов, окислительно-восстановительных ферментов, органических кислот. С помощью ферментов (оксидоредуктаз, эстераз) микроорганизмы путем окисления, восстановления, декарбоксилирования, этерификации, гидролиза и других реакций разрушают низкомолекулярные фракции полимеров, молекулы пластификаторов, ациклические и ароматические углеводороды, входящие в состав эластомеров, гудронов, битумов² [18]. Микроорганизмы могут ускорить процессы деструкции материалов при определенных условиях в тысячи раз и наносить огромный материальный ущерб.

Существуют различные методы оценки и прогнозирования долговечности покрытий, в том числе на основе асфальтобетона: по данным визуального осмотра, интенсивности износа, долговременной прочности, прочности при сдвиге и т.д. [4, 6, 7, 18, 19].

Процесс старения асфальтобетона на поверхности и в глубине покрытия в связи с различием действия факторов протекает неодинаково. В верхней части покрытия за малый срок эксплуатации асфальтобетон может сильно состариться, а в нижней части

¹ Государственная регистрация программы для ЭВМ № 2018611243. Программа оценки изменения цветности цементных, полимерцементных, полимерных и иных композиционных материалов под воздействием различных эксплуатационных факторов / В.Т. Ерофеев, В.В. Афонин, И.В. Ерофеева, О.А. Мишуняева; заявл. от 01.12.2017; опубл. 26.01.2018. Бюл. 2.

² Методика определения физико-механических свойств полимерных композитов путем внедрения конусообразного индентора // НИИ Госстроя Эстонской ССР. Таллин, 1983. 28 с.

материал сохраняет свои упруго-прочностные свойства.

Поэтому практическую ценность имеют результаты исследования, характеризующие изменения свойств материала на поверхности. В качестве изучаемых свойств на поверхности композитов в работе рассматривается твердость, значения которой анализировались при выдерживании материалов в биологической среде. Также проводились исследования физико-механических характеристик асфальтобетонных различных составов, содержащих заданные компоненты в массовых долях, выраженных в процентах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изготовления образцов асфальтобетонных использованы следующие компоненты.

Битум марки БНД 60/90 со следующими характеристиками: глубина проникания иглы 0,1 мм при 25 °С — 85; глубина проникания иглы 0,1 мм при 0 °С — 35; температура размягчения по кольцу и шару 0 °С — 48; растяжимость — 83 см; индекс пенетрации — 0,6.

В качестве наполнителей применялись: минеральный порошок, порошок на основе стеклобоя, пищевая мука.

Использовался неактивированный минеральный порошок марки МП-1 из карбонатных пород с истинной и средней плотностью, соответственно 2,71 и 1,71 г/см³. Стеклопорошок получали измельчением отходов стекла ОАО «Лисма» (г. Саранск). Химический состав отходов производства стекла включал (в % по массе): SiO₂ — 68,75–72,90; Na₂O — 11,9–16,7; K₂O — 1,2–3,8; CaO — 5,0–6,0; BaO — 2,2–5,5; MgO — 3,2–3,8; Fe₂SO₄ — 0,1–0,12; Al₂O₃ — 1,0–1,5. Пищевая мука рассматривалась как добавка, являющаяся питательной средой для мицелиальных грибов.

В качестве мелкого заполнителя применялся кварцевый песок карьера пос. Смольный Республики

Мордовия с модулем крупности $M_k = 1,77$, истинной плотностью — 2600 кг/м³, песчаной плотностью — 1200 кг/м³, содержанием пылевидных и глинистых частиц — 2,7 %, пустотностью — 99,5 %; а также отсеvy дробления щебня фракции 2,5–10 мм с насыпной плотностью — 1585 кг/м³, с содержанием зерен пластинчатой и лещадной формы — 3 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении исследования в качестве объектов рассматривались асфальтобетоны, относящиеся по структуре к плотным и высокопористым материалам, в качестве свойств — изменение показателя твердости на поверхности образцов асфальтобетонных в зависимости от длительности их экспозиции в агрессивной среде. По данным эксперимента выполнялась операция линейного интерполирования значений показателя твердости на поверхности изучаемых образцов асфальтобетонных различных тестовых составов. На основе предлагаемого эвристического метода сравнительной оценки величины среднеквадратичного отклонения интерполированной кривой и прямой, соединяющей граничные экспериментальные точки, выполнено ранжирование исследованных составов асфальтобетона. Проводимое ранжирование предполагает упорядочивание составов исследованных образцов в плане их устойчивости к осуществленным испытаниям в агрессивной среде, вид которой может быть достаточно произвольным.

Исследуемые составы с названными компонентами в процентном соотношении приведены в табл. 1.

Различное содержание нефтяного битума было назначено для определения влияния структуры асфальтобетона на изменение его свойств в процессе биокоррозии. Физико-механические свойства отдельных составов, определенные по общепринятым методикам, приведены в табл. 2.

Табл. 1. Содержание компонентов в асфальтобетонных смесях

Table 1. The content of components in asphalt concrete mixtures

Составляющие Components	Содержание составляющих в составах, мас. % The content of components in the compositions, mass %																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Природный песок Natural sand	87	87	60	60	25	25	87	87	87	87	60	60	25	25	87	87	60	60	25	25	87	87
Отсев дробления Screening	–	–	34	34	69	69	–	–	–	–	34	34	69	69	–	–	34	34	69	69	–	–
Минеральный порошок Mineral powder	13	13	6	6	6	6	–	–	13	13	6	6	6	6	–	–	–	–	–	–	13	13
Мука Flour	–	–	–	–	–	–	13	13	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Стеклобой Cullet	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	13	13	6	6	6	6	–	–

Окончание табл. 1 / End of the Table 1

Составляющие Components	Содержание составляющих в составах, мас. % The content of components in the compositions, mass %																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Битум БНД 60/90, сверх 100 % Viscous petroleum bitumen 60/90, over 100 %	12	8	10	6	6	10	8	12	–	–	–	–	–	–	8	12	10	6	6	10	8	12
ПБВ, сверх 100 % Polymer-bitumen binder, over 100 %	–	–	–	–	–	–	–	–	8	12	10	6	6	10	–	–	–	–	–	–	–	–

Табл. 2. Физико-механические свойства полученных составов асфальтобетонной смеси

Table 2. Physical and mechanical properties of the resulting compositions of the asphalt concrete mixture

Физико-механические свойства Physical and mechanical properties	Номер состава Composition number												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	17	18
Средняя плотность уплотненного материала, кг/м³ Average density of compacted material, g/cm³	2070	2150	2190	2190	2260	2150	2310	2360	2330	1980	2030	2210	2130
Водонасыщение, % по объему Water saturation, volume percent	12	6	0,75	8,65	3,01	12,4	9,3	0,1	4,7	16	10,3	13,4	13,4
Предел прочности при сжатии, $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, МПа Ultimate compressive strength, $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, MPa	0,95	1,04	0,86	1,46	1,82	0,62	2,32	2,74	2,23	0,57	0,73	1,48	1,45
Предел прочности при сжатии, $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, МПа Ultimate compressive strength, $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, MPa	2,15	3,81	2,73	4,19	4,53	2,77	6,35	7,11	7,4	2,16	2,8	3,64	2,84
Предел прочности при сжатии, $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, МПа Ultimate compressive strength, $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, MPa	6,38	5,92	5,57	7,43	8	5,14	9,49	10,69	11,3	3,4	4,3	5,77	4,92
Водостойкость Water resistance	1,38	0,83	1,01	0,93	1,02	1,03	0,88	1,03	0,74	0,88	1,12	0,79	1,05
Длительная водостойкость Long-lasting water resistance	0,71	1,12	0,75	0,44	0,73	—	—	—	—	—	—	—	—

В табл. 2 представлены свойства двух типов асфальтобетонов — Г и Д. По каждому типу рассматривались плотные и высокопористые асфальтобетонные смеси. В перечень определенных физико-механических свойств асфальтобетонов входили: средняя плотность уплотненного материала; предел прочности при сжатии при температурах 0, 20 и 50 °C; водонасыщение по объему; водостойкость и длительная водостойкость. Среди исследуемых асфальтобетонов выделены составы, имеющие улучшенные физико-механические свойства.

Далее образцы были разделены на четыре группы. Образцы первой группы выступали в качестве контрольных, образцы второй выдерживались в биологической среде микроорганизмов один месяц, образцы третьей выдерживались в биологической среде микроорганизмов три месяца, образцы четвертой выдерживались в биологической среде микроорганизмов шесть месяцев.

Оценивалось изменение физико-механических характеристик асфальтобетонов по показателю твердости после воздействия мицелиальных грибов

по сравнению с контрольными образцами того же состава. Время испытаний в биосреде соответствует 0; 1; 3; 6 мес., где 0 мес. — начало испытаний, когда замеряются значения свойств (твердость) контрольных образцов (составов).

Исследовалось изменение показателя твердости материала через 15 мин после приложения нагрузки Т15. Испытания материалов проводились с использованием консистометра Гепплера². Показатели твердости асфальтобетонных образцов представлены в табл. 3 и на рис. 1–6.

Далее выполнено линейное интерполирование данных с шагом в один месяц. Так как эта операция применяется для всех исследуемых составов, то возможные ошибки интерполяции можно считать не-

которой инструментальной ошибкой, которая связана со всеми составами. Табл. 6 представлена как результат проведенных экспериментов со съемом данных каждый месяц в течение полугода.

Результаты расчетного экспонирования первой группы в биосреде асфальтобетонных составов типа Г с учетом проведенной интерполяции приведены в табл. 4.

Данные табл. 4 могут быть использованы для построения графиков твердости составов относительно времени экспонирования, а также определения прямых линий, соединяющих значения твердости контрольных составов и значения твердости составов за период экспонирования (рис. 1).

Табл. 3. Твердость асфальтобетонных составов типа Г до и после экспонирования в биосреде

Table 3. Hardness of asphalt concrete compositions of type G before and after exposure in the biological environment

Номер состава Composition number	Твердость, МПа / Hardness, MPa				Примечание / Note
	Контрольный состав Control composition	Продолжительность выдерживания в биосреде, мес. Duration of exposure to the biological environment, months			
		1 месяц 1 month	3 месяца 3 months	6 месяцев 6 months	
1	1,48	0,61	1,36	1,6	Плотная асфальтобетонная смесь типа Г Dense asphalt concrete mixture of type G
8	0,84	0,45	0,56	0,32	
10	1,48	0,8	2,16	2,77	
16	1,27	1,44	0,83	1,55	
22	0,28	0,62	0,61	0,38	
2	0,33	0,48	2,01	1,03	Высокопористая песчаная асфальтобетонная смесь Highly porous sandy asphalt concrete mix
7	0,05	0,14	0,4	0,05	
9	0,05	0,44	2,16	0,69	
15	0,57	1,09	0,72	0,4	
21	0,05	0,44	0,36	0,49	
3	0,05	1,1	1,19	1,4	Плотная асфальтобетонная смесь типа Г Dense asphalt concrete mixture of type G
11	3,4	1,09	3,26	5,12	
17	0,99	3,97	0,67	2,37	
4	0,05	6,66	1,62	3,21	Высокопористая песчаная асфальтобетонная смесь Highly porous sandy asphalt concrete mix
12	0,05	0,15	14,98	2,74	
18	1,09	1,34	2,06	1,14	
5	0,37	11,77	1,75	12,19	Высокопористая песчаная асфальтобетонная смесь Highly porous sandy asphalt concrete mix
13	0,05	6,76	1,72	26,18	
19	4,32	4,03	3,91	2,73	
6	1,06	0,76	6,99	7,35	Плотная асфальтобетонная смесь типа Д Dense asphalt concrete mixture of type D
14	3,35	12,21	1,45	8,82	
20	0,05	3,75	3,68	2,61	

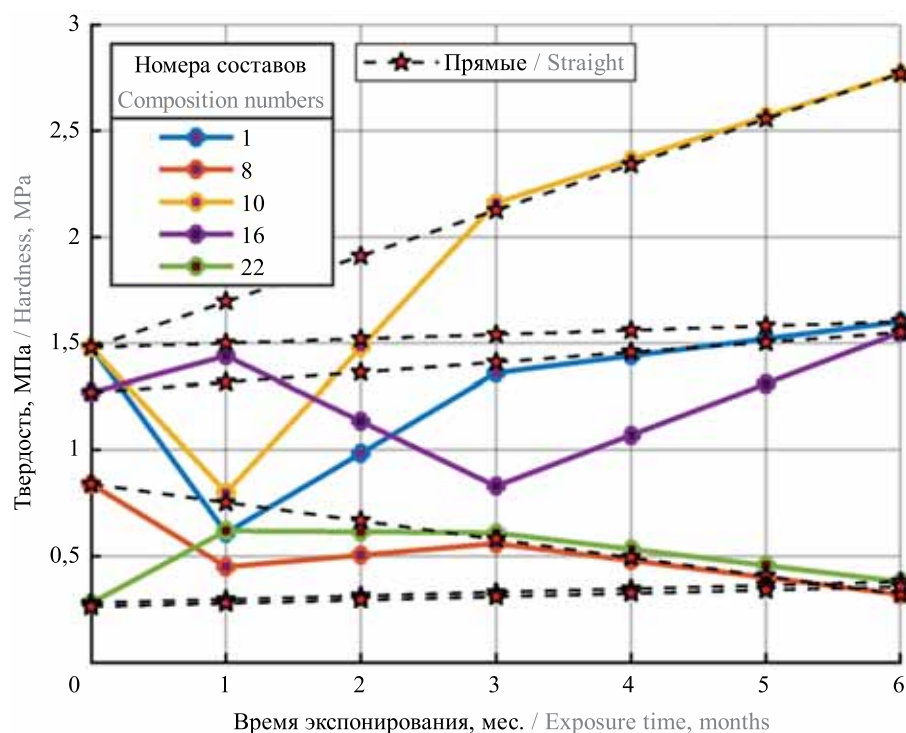


Рис. 1. Изменение твердости составов первой группы и прямых, соединяющих крайние точки испытаний во времени
Fig. 1. Temporal variation of hardness of the 1st group compositions and the straight lines connecting extreme testing points

Табл. 4. Твердость асфальтобетонных составов типа Г до и после экспонирования в биосреде

Table 4. Hardness of asphalt concrete compositions of type G before and after exposure to the biological environment

Тестовые составы Tested compositions	Контрольные составы Control compositions	Расчетное время экспонирования в биосреде, мес. Estimated time of exposure to the biological environment, months					
	0, мес. 0, month	1	2	3	4	5	6
	Твердость, МПа / Hardness, MPa						
1	1,48	0,61	0,985	1,36	1,44	1,52	1,6
8	0,84	0,45	0,505	0,56	0,48	0,4	0,32
10	1,48	0,8	1,48	2,16	2,3633	2,5667	2,77
16	1,27	1,44	1,135	0,83	1,07	1,31	1,55
22	0,28	0,62	0,615	0,61	0,53333	0,45667	0,38

Для расчета среднеквадратической ошибки $E_2(f)$ между прямыми и ломаными твердости составов применялась следующая формула [20]:

$$E_2(f) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [f(x_k) - y_k]^2}, \quad (1)$$

где n — количество исследуемых составов; $f(x_k)$ — значения прямых линий; y_k — значения экспериментальных кривых изменения твердости составов.

Ранжирование составов 1-й группы по величине среднеквадратической ошибки приведено в табл. 5.

Табл. 5. Ранжирование составов 1-й группы плотной асфальтобетонной смеси типа Г

Table 5. Ranking of the 1st group compositions of dense asphalt concrete mixture of type G

Номер состава Composition number	Среднеквадратическая ошибка Root-mean-square error
8	0,13026
22	0,21297
16	0,29048
10	0,37566
1	0,40156

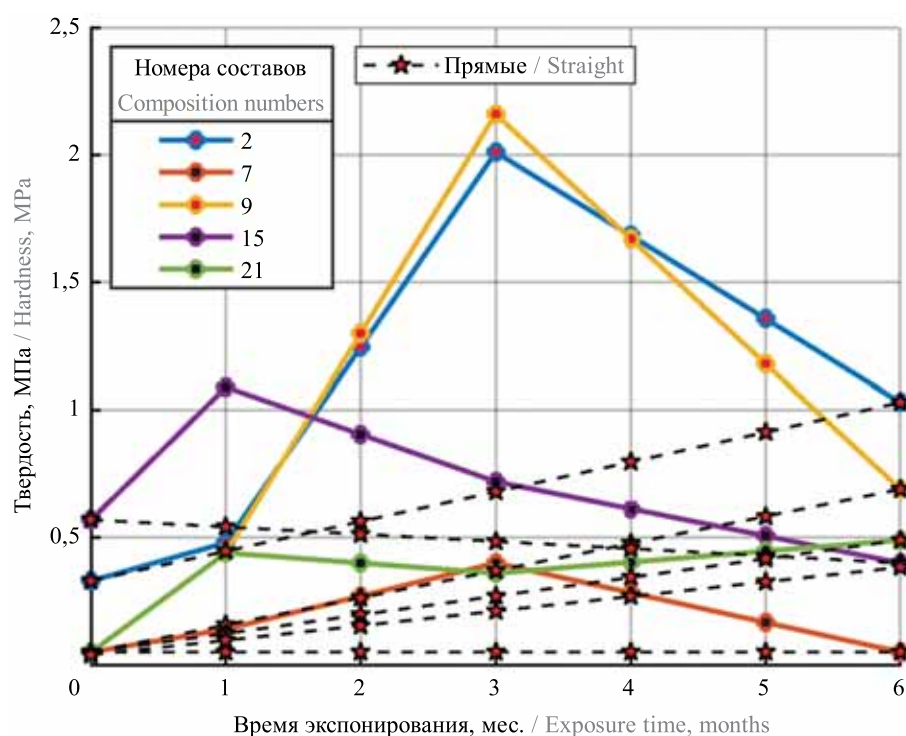


Рис. 2. Изменение твердости составов 2-й группы высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси и прямых, соединяющих крайние точки испытаний во времени

Fig. 2. Temporal variation of hardness of the 2nd group compositions of highly porous sandy asphalt concrete mixture and straight lines connecting the extreme testing points

Табл. 6. Твердость высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси до и после экспонирования в биосреде
Table 6. Hardness of highly porous sandy asphalt concrete mixture before and after exposure to the biological medium

Тестовые составы Tested compositions	Контрольные составы Control compositions	Время экспонирования в биосреде, мес. Time of exposure to the biological environment, months					
	0, мес. / 0, month	1	2	3	4	5	6
	Твердость, МПа / Hardness, MPa						
2	0,33	0,48	1,245	2,01	1,6833	1,3567	1,03
7	0,05	0,14	0,27	0,4	0,28333	0,16667	0,05
9	0,05	0,44	1,3	2,16	1,67	1,18	0,69
15	0,57	1,09	0,905	0,72	0,61333	0,50667	0,4
21	0,05	0,44	0,4	0,36	0,40333	0,44667	0,49

По данным табл. 5 делается предположение, что состав 8 по своей твердости более устойчив по сравнению с другими составами 1-й группы плотной асфальтобетонной смеси типа Г.

Результаты расчетного экспонирования 2-й группы в биосреде высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси представлены в табл. 6.

На рис. 2 показаны графики изменения твердости 2-й группы высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси.

Ранжирование составов 2-й группы высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси по величине среднеквадратической ошибки приведено в табл. 7.

Табл. 7. Ранжирование составов 2-й группы высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси

Table 7. Ranking of the 2nd group compositions of highly porous sandy asphalt concrete mixture

Номер состава Composition number	Среднеквадратическая ошибка Root-mean-square error
21	0,14843
7	0,18787
15	0,27774
2	0,67796
9	0,93649

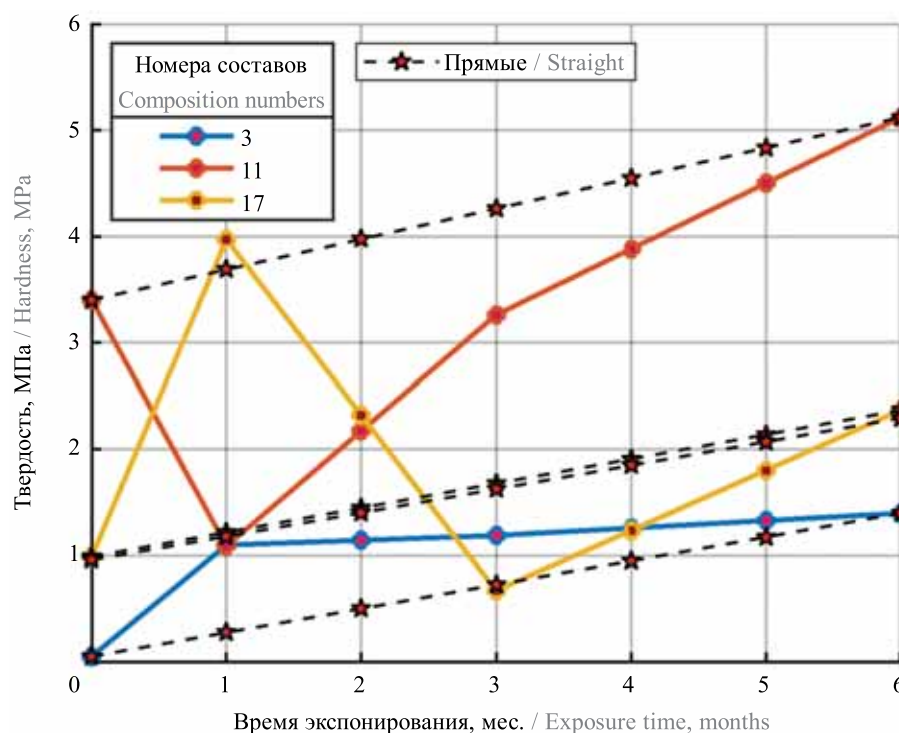


Рис. 3. Изменение твердости составов 3-й группы плотной асфальтобетонной смеси типа Г и прямых, соединяющих крайние точки испытаний во времени

Fig. 3. Temporal variation of hardness of the 3rd group compositions of dense asphalt concrete mixture of type G and straight lines connecting the extreme testing points

Табл. 8. Твердость асфальтобетонных составов типа Г до и после экспонирования в биосреде

Table 8. Hardness of asphalt concrete compositions of type G before and after exposure to the biological environment

Тестовые составы Tested compositions	Контрольные составы Control compositions	Время экспонирования в биосреде, мес. Time of exposure to the biological environment, months					
	0, мес. / 0, month	1	2	3	4	5	6
	Твердость, МПа / Hardness, MPa						
3	0,05	1,1	1,145	1,19	1,26	1,33	1,4
11	3,4	1,09	2,175	3,26	3,88	4,5	5,12
17	0,99	3,97	2,32	0,67	1,2367	1,8033	2,37

Табл. 9. Ранжирование составов 3-й группы плотной асфальтобетонной смеси типа Г

Table 9. Ranking of the 3rd group compositions of dense asphalt concrete mixture of type G

Номер состава Composition number	Среднеквадратическая ошибка Root-mean-square error
3	0,45245
17	1,1896
11	1,2835

По результатам, приведенным в табл. 7, можно сделать предположение, что при испытаниях в агрессивной биосреде состав 21 по своей твердости более устойчив по сравнению с другими составами 2-й группы высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси.

Результаты расчетного экспонирования 3-й группы в биосреде асфальтобетонных составов типа Г показаны в табл. 8.

На рис. 3 показаны графики изменения твердости 3-й группы плотной асфальтобетонной смеси типа Г.

Ранжирование составов 3-й группы плотной асфальтобетонной смеси типа Г по величине среднеквадратической ошибки приведено в табл. 9.

Согласно табл. 9 можно предположить, что состав 3-й группы по своей твердости более устойчив по сравнению с другими составами плотной асфальтобетонной смеси типа Г. Результаты расчетного экспонирования 4-й группы в биосреде высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси приведены в табл. 10.

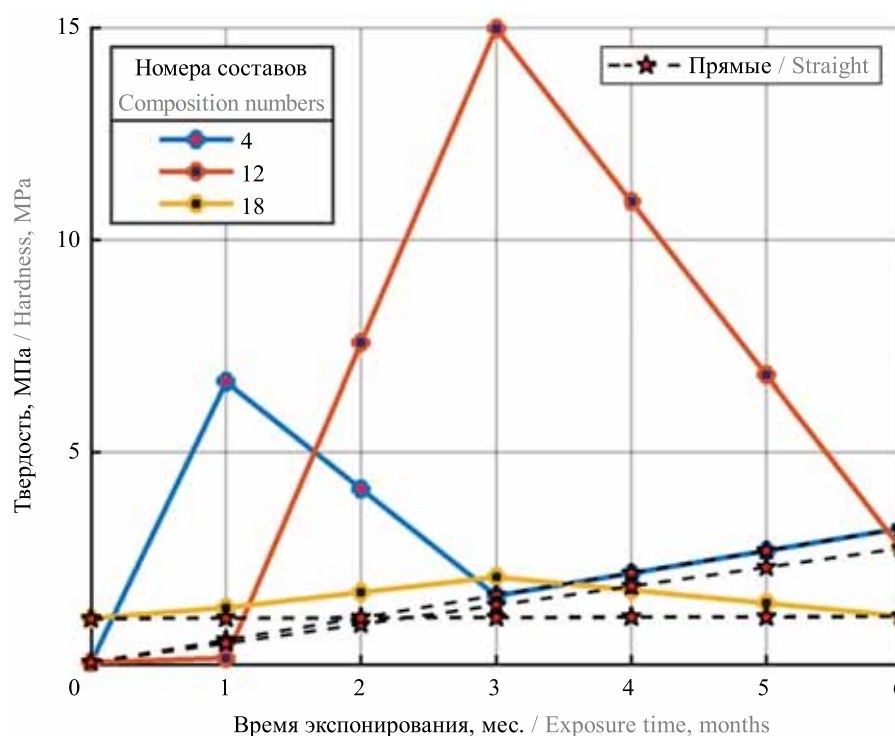


Рис. 4. Изменение твердости составов 4-й группы высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси и прямых, соединяющих крайние точки

Fig. 4. A change in the hardness of the 4th group compositions of highly porous sandy asphalt concrete mixture and straight lines connecting the extreme points

Табл. 10. Твердость высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси до и после экспонирования в биосреде

Table 10. Hardness of a highly porous sandy asphalt concrete mixture before and after exposure in a biological medium

Тестовые составы Tested compositions	Контрольные составы Control compositions	Время экспонирования в биосреде, мес. Time of exposure to the biological environment, months					
	0, мес. / 0, month	1	2	3	4	5	6
	Твердость, МПа / Hardness, MPa						
4	0,05	6,66	4,14	1,62	2,15	2,68	3,21
12	0,05	0,15	7,565	14,98	10,9	6,82	2,74
18	1,09	1,34	1,7	2,06	1,7533	1,4467	1,14

На рис. 4 показаны графики изменения твердости 4-й группы высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси.

Ранжирование составов 4-й группы высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси по величине среднеквадратической ошибки представлено в табл. 11.

Из табл. 11 видно, что состав 18 по своей твердости более устойчив по сравнению с другими составами 4-й группы высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси.

Результаты экспонирования 5-й группы в биосреде высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси приведены в табл. 12.

На рис. 5 показаны графики изменения твердости 5-й группы высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси.

Табл. 11. Ранжирование составов 4-й группы высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси

Table 11. Ranking of compositions of the 4th group of highly porous sandy asphalt concrete mixture

Номер состава Composition number	Среднеквадратическая ошибка Root-mean-square error
18	0,50704
4	2,5698
12	6,8765

Ранжирование составов 5-й группы высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси по величине среднеквадратической ошибки приведено в табл. 13.

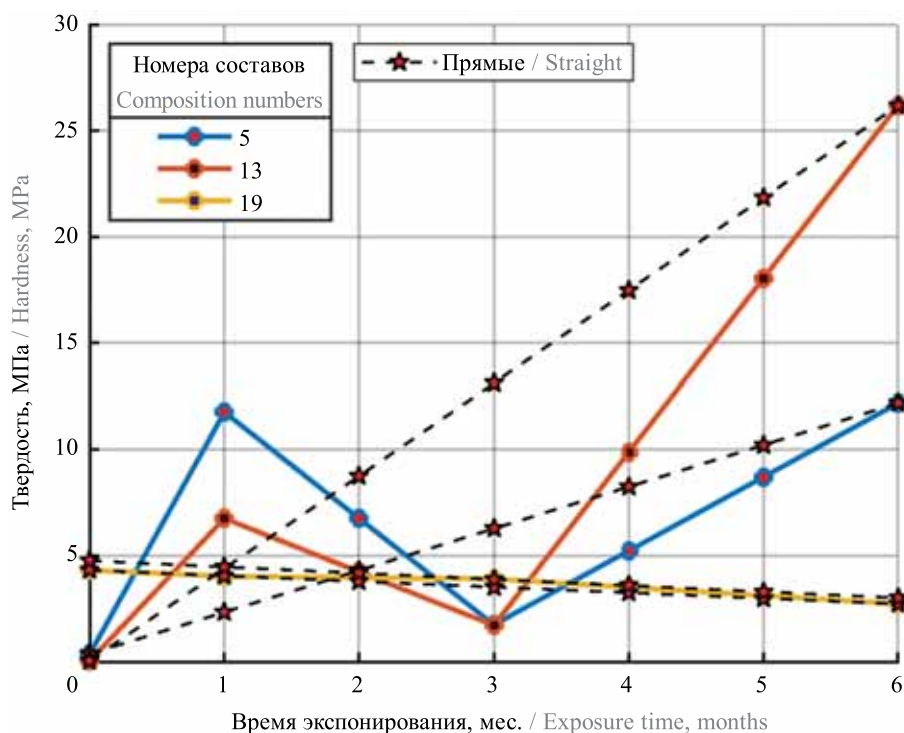


Рис. 5. Изменение твердости составов 5-й группы высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси и прямых, соединяющих крайние точки

Fig. 5. A change in the hardness of the 5th group compositions of highly porous sandy asphalt concrete mixture and straight lines connecting the extreme points

Табл. 12. Твердость высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси до и после экспонирования в биосреде

Table 12. Hardness of highly porous sandy asphalt concrete mixture before and after exposure to the biological medium

Тестовые составы Tested compositions	Контрольные составы Control compositions	Время экспонирования в биосреде, мес. Time of exposure to the biological environment, months					
	0, мес. / 0, month	1	2	3	4	5	6
	Твердость, МПа / Hardness, MPa						
5	0,37	11,77	6,76	1,75	5,23	8,71	12,19
13	0,05	6,76	4,24	1,72	9,8733	18,027	26,18
19	4,32	4,03	3,97	3,91	3,5167	3,1233	2,73

Учитывая табл. 13, можно сделать предположение, что состав 19 по своей твердости более устойчив по сравнению с другими составами 5-й группы высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси.

Расчетные результаты экспонирования 6-й группы в биосреде плотной асфальтобетонной смеси типа Д представлены в табл. 14.

На рис. 6 показаны графики изменения твердости 6-й группы плотной асфальтобетонной смеси типа Д.

Ранжирование составов 6-й группы плотной асфальтобетонной смеси типа Д по величине среднеквадратической ошибки приведено в табл. 15.

По результатам, приведенным в табл. 15, можно сделать эвристическое предположение, что состав 6

по своей твердости более устойчив по сравнению с другими составами 6-й группы плотной асфальтобетонной смеси типа Д.

Табл. 13. Ранжирование составов 5-й группы высокопористой песчаной асфальтобетонной смеси

Table 13. Ranking of the 5th group compositions of highly porous sandy asphalt concrete mixture

Номер состава Composition number	Среднеквадратическая ошибка Root-mean-square error
19	0,19405
5	4,2569
13	5,7066

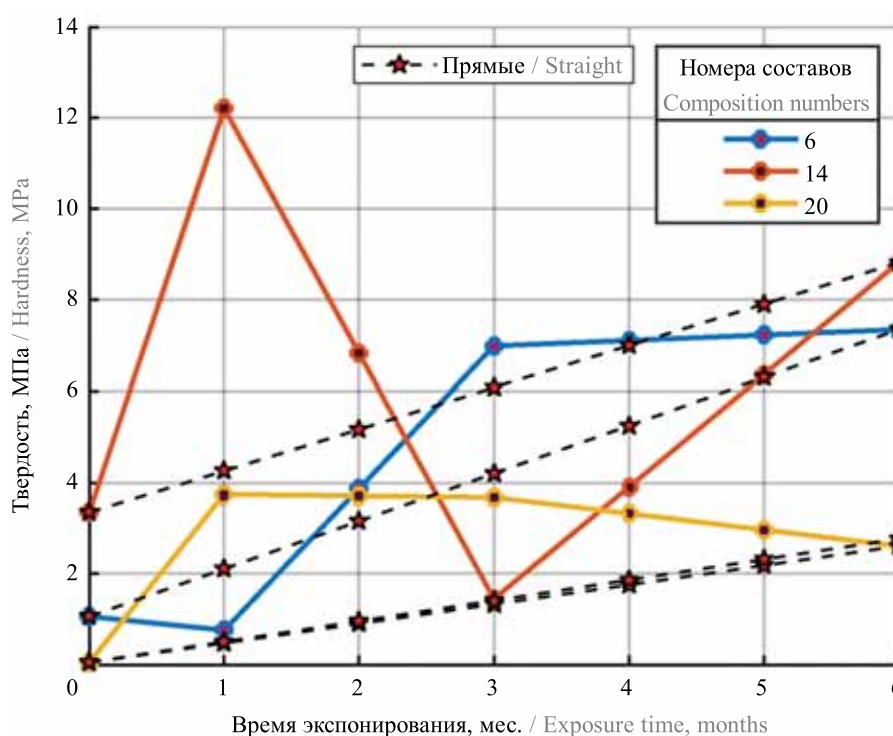


Рис. 6. Изменение твердости составов 6-й группы плотной асфальтобетонной смеси типа Д и прямых, соединяющих крайние точки

Fig. 6. A change in the hardness of the 6th group compositions of dense asphalt concrete mixture of type D and straight lines connecting the extreme points

Табл. 14. Твердость плотной асфальтобетонной смеси типа Д до и после экспонирования в биосреде

Table 14. Hardness of dense asphalt concrete mixture of type D before and after exposure to the biological medium

Тестовые составы Tested compositions	Контрольные составы Control compositions	Время экспонирования в биосреде, мес. Time of exposure to the biological environment, months					
	0, мес. / 0, month	1	2	3	4	5	6
	Твердость, МПа / Hardness, MPa						
6	1,06	0,76	3,875	6,99	7,11	7,23	7,35
14	3,35	12,21	6,83	1,45	3,9067	6,3633	8,82
20	0,05	3,75	3,715	3,68	3,3233	2,9667	2,61

Табл. 15. Ранжирование составов 6-й группы плотной асфальтобетонной смеси типа Д

Table 15. Ranking of the 6th group compositions of dense asphalt concrete mixture of type D

Номер состава Composition number	Среднеквадратическая ошибка Root-mean-square error
6	1,4342
20	1,9716
14	3,7671

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В проведенных исследованиях сделаны выводы об оценке твердости каждой группы образцов рассмотренных составов. Указаны способы и приемы, которые позволяют ранжировать составы по величине среднеквадратической ошибки относительно экс-

периментальных данных и введенных прямых линий, соединяющих крайние точки экспериментальных данных. Приведенные результаты с эвристических позиций дают возможность оценить качество асфальтобетонных составов при их экспонировании в биосреде. Предложенный подход оценки качества асфальтобетонных составов может быть распространен на другие строительные материалы и изделия, подверженные определенным агрессивным воздействиям, в результате которых за определенный отрезок времени экспонирования необходимо произвести оценку качества материала по заданному/выбранному свойству. В то же время авторы отдают себе отчет, что требуются большие экспериментальные исследования, подтверждающие или опровергающие предлагаемые подходы в оценке качества асфальтобетонных составов и других бетонных материалов и композитов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ерофеев В.Т., Ямашкин А.А., Смирнов В.Ф., Светлов Д.А., Вильдяева М.В., Ямашкин С.А. Биодеструктивные процессы в эколого-социально-производственных системах жилой застройки // Приволжский научный журнал. 2018. № 2 (46). С. 116–123.
2. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Ерофеев В.Т., Родин А.И., Смирнов В.Ф., Родина Н.Г. Биологическая стойкость цементных композитов // Гидротехническое строительство. 2017. № 8. С. 13–19.
3. Старцев О.В., Молоков М.В., Ерофеев В.Т., Кротов А.С., Гудожников С.С. Влияние климатического старения на показатели влагопереноса древесины с защитными покрытиями // Фундаментальные исследования. 2016. № 3–3. С. 526–532.
4. Радовский Б.С., Телтаев Б.Б. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям // Автомобильные дороги. 2013. № 8. С. 50–60.
5. Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф. Влажностный режим помещений зданий при наличии в материале стен гигроскопических солей // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 12 (720). С. 62–74.
6. Ерофеев В.Т., Ликомаскина М.А. Оценка долговечности асфальтобетонов при испытаниях в климатических условиях с переменной влажностью ультрафиолетовым облучением и агрессивной морской водой // Вестник МГСУ. 2016. № 6. С. 63–79.
7. Ерофеев В.Т. и др. Дорожные битумо-минеральные материалы на основе модифицированных битумов (технология, свойства, долговечность) / под общ. ред. Ю.М. Баженова, В.Т. Ерофеева. Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2009. 273 с.
8. Grengg C., Mittermayr F., Baldermann A., Böttcher M.E., Leis A., Koraimann G. et al. Microbiologically induced concrete corrosion: A case study from a combined sewer network // Cement and Concrete Research. 2015. Vol. 77. Pp. 16–25. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.06.011
9. Gutarowska B., Kotynia R., Bieliński D., Anyszka R., Wręczycki J., Piotrowska M. et al. New Sulfur organic polymer-concrete composites containing waste materials: mechanical characteristics and resistance to biocorrosion // Materials. 2019. Vol. 12. Issue 16. P. 2602. DOI: 10.3390/ma12162602
10. Thomas C., Lombillo I., Polanco J.A., Villegas L., Setián J., Biezta M.V. Polymeric and cementitious mortars for the reconstruction of natural stone structures exposed to marine environments // Composites Part B: Engineering. 2010. Vol. 41. Issue 8. Pp. 663–672. DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.08.007
11. Nazemi M.K., Valix M. Evaluation of acid diffusion behaviour of amine-cured epoxy coatings by accelerated permeation testing method and prediction of their service life // Progress in Organic Coatings. 2016. Vol. 97. Pp. 307–312. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2016.04.025
12. Ribeiro C.C., da Silva Pinto J.D., Godoy G.C., Buono V.T.L., Starling T. Microstructural and topographic characterization of concrete protected by acrylic paint // Materials Research. 2013. Vol. 16. Issue 4. Pp. 817–823. DOI: 10.1590/S1516-14392013005000042
13. Lee H.S., Sho K.H. Development of sulfuric acid resistant concrete sewer pipes using waste glass powder and meta-kaolin // Journal of Ceramic Processing Research. 2018. Vol. 19. Issue 2. Pp. 105–110.
14. Vipulanandan C., Liu J. Polymer coatings for concrete surfaces // Handbook of Environmental Degradation of Materials. 2012. Pp. 621–653. DOI: 10.1016/B978-1-4377-3455-3.00021-3
15. Wei S., Jiang Z., Liu H., Zhou D., Sanchez-Silva M. Microbiologically induced deterioration of concrete: a review // Brazilian Journal of Microbiology. 2013. Vol. 44. Issue 4. Pp. 1001–1007. DOI: 10.1590/S1517-83822014005000006
16. Wu M., Wang T., Wu K., Kan L. Microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures: A review of the mechanisms and phenomena // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 239. P. 117813. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117813
17. Kong L., Liu C., Cao M., Fang J. Mechanism study of the role of biofilm played in sewage corrosion of mortar // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 164. Pp. 44–56. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.190
18. Domingos Y.S., dos Santos Felipe R.C.T., Felipe R.N.B., Fernandes G.J.T. Evaluation of the environmental aging of the glass fiber-reinforced polymer composite when in contact with the effluent of a treatment plant // Journal of Composite Materials. 2020. Vol. 54. Issue 11. Pp. 1385–1402. DOI: 10.1177/0021998319878766
19. Небратонко Д. Полимерно-битумные вяжущие на мостах // Автомобильные дороги. 2010. № 9. С. 53–54.
20. Ерофеев В.Т., Максимова И.Н., Афонин В.В. Методы обработки экспериментальных данных : учеб. пособие. Саранск : Изд-во Мордовского ун-та, 2019. 140 с.

Поступила в редакцию 10 июля 2022 г.

Принята в доработанном виде 12 октября 2022 г.

Одобрена для публикации 12 октября 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Трофимович Ерофеев — доктор технических наук, профессор, декан факультета архитектурно-строительного факультета, академик РААСН; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева);** 430005, г. Саранск, ул. Больше-вистская, д. 68; РИНЦ ID: 161483; Scopus: 56662851300; ResearcherID: A-7827-2017; ORCID: 0000-0001-8407-8144; fac-build@adm.mrsu.ru;

Майя Алексеевна Ликомаскина — аспирант кафедры строительных материалов и технологий архитек-турно-строительного факультета; **Национальный исследовательский Мордовский государственный уни-верситет им. Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева);** 430005, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68; РИНЦ ID: 1156302; chakichevama@list.ru;

Виктор Васильевич Афонин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления; **Национальный исследовательский Мордовский государствен-ный университет им. Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева);** 430005, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68; РИНЦ ID: 101166; Scopus: 57214232767; ResearcherID: AAB-4881-2022; ORCID: 0000-0001-7976-9792; vvafonin53@yandex.ru;

Анжелика Игоревна Архипова — кандидат технических наук, начальник отдела управления интеллек-туальной собственностью; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева);** 430005, г. Саранск, ул. Большевистская, д. 68; РИНЦ ID: 742901; ResearcherID: L-6923-2016; ORCID: 0000-0002-7782-2817; anzhelika_salnikova@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Erofeev V.T., Yamashkin A.A., Smirnov V.F., Svetlov D.A., Vildyaeva M.V., Yamashkin S.A. Biode-structive processes in ecological-social and production systems of housing construction. *Volga Scientific Jour-nal*. 2018; 2(46):116-123. (rus.).
2. Travush V.I., Karpenko N.I., Erofeev V.T., Ro-din A.I., Smirnov V.F., Rodina N.G. Biological stability of cement composites. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2017; 8:13-19. (rus.).
3. Startsev O.V., Molokov M.V., Erofeev V.T., Krotov A.S., Gudozhnikov S.S. The influence of natu-ral weathering on moisture transfer in wood with pro-protective coatings. *Fundamental Research*. 2016; 3-3: 526-532. (rus.).
4. Radovsky B.S., Teltaev B.B. Viscoelastic cha-racteristics of bitumen and their assessment by standard indicators. *Automobile roads*. 2013; 8:50-60. (rus.).
5. Erofeev V.T., El'chishcheva T.F. Wettime mode of building premises in the existence of hygroscopic salts in the material of the walls. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2018; 12(720):62-74. (rus.).
6. Erofeev V.T., Likomaskina M.A. Durability esti-mation of asphalt concrete tested in the climatic condi-tions with varying humidity, ultraviolet radiation and aggressive sea water. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016; 6:63-79. (rus.).
7. Erofeev V.T. et al. *Road bitumen-mineral mate-rials based on modified bitumens (technology, properties, durability) : monograph*. Saransk, Publishing House of Mordovian University, 2009; 276. (rus.).
8. Grengg C., Mittermayr F., Baldermann A., Böttcher M.E., Leis A., Koraimann G. et al. Micro-biologically induced concrete corrosion: A case study from a combined sewer network. *Cement and Con-crete Research*. 2015; 77:16-25. DOI: 10.1016/j.cem-conres.2015.06.011
9. Gutarowska B., Kotynia R., Bieliński D., Any-szka R., Wręczycki J., Piotrowska M. et al. New Sul-fur Organic Polymer-Concrete Composites Containing Waste Materials: Mechanical Characteristics and Resis-tance to Biocorrosion. *Materials*. 2019; 12(16):2602. DOI: 10.3390/ma12162602
10. Thomas C., Lombillo I., Polanco J.A., Vil-legas L., Setién J., Biezma M.V. Polymeric and ce-mentitious mortars for the reconstruction of natural stone structures exposed to marine environments. *Composites Part B: Engineering*. 2010; 41(8):663-672. DOI: 10.1016/j.compositesb.2010.08.007
11. Nazemi M.K., Valix M. Evaluation of acid diffusion behaviour of amine-cured epoxy coatings by accelerated permeation testing method and prediction of their service life. *Progress in Organic Coatings*. 2016; 97:307-312. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2016.04.025
12. Ribeiro C.C., da Silva Pinto J.D., Godoy G.C., Buono V.T.L., Starling T. Microstructural and topo-graphic characterization of concrete protected by acry-lic paint. *Materials Research*. 2013; 16(4):817-823. DOI: 10.1590/S1516-14392013005000042
13. Lee H.S., Sho K.H. Development of sulfuric acid resistant concrete sewer pipes using waste glass powder and meta-kaolin. *Journal of Ceramic Proces-sing Research*. 2018; 19(2):105-110.

14. Vipulanandan C., Liu J. Polymer Coatings for Concrete Surfaces. *Handbook of Environmental Degradation of Materials*. 2012; 621-653. DOI: 10.1016/B978-1-4377-3455-3.00021-3
15. Wei S., Jiang Z., Liu H., Zhou D., Sanchez-Silva M. Microbiologically induced deterioration of concrete: a review. *Brazilian Journal of Microbiology*. 2013; 44(4):1001-1007. DOI: 10.1590/S1517-83822014005000006
16. Wu M., Wang T., Wu K., Kan L. Microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures: A review of the mechanisms and phenomena. *Construction and Building Materials*. 2020; 239:117813. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117813
17. Kong L., Liu C., Cao M., Fang J. Mechanism study of the role of biofilm played in sewage corrosion of mortar. *Construction and Building Materials*. 2018; 164:44-56. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.190
18. Domingos Y.S., dos Santos Felipe R.C.T., Felipe R.N.B., Fernandes G.J.T. Evaluation of the environmental aging of the glass fiber-reinforced polymer composite when in contact with the effluent of a treatment plant. *Journal of Composite Materials*. 2020; 54(11):1385-1402. DOI: 10.1177/0021998319878766
19. Nebratonko D. Polymer-bitumen binders for bridges. *Automobile roads*. 2010; 9:53-54. (rus.).
20. Erofeev V.T., Maksimova I.N., Afonin V.V. *Methods of experimental data processing*. Saransk, Publishing House of Mordovian University, 2019; 140.

Received July 10, 2022.

Adopted in revised form on October 12, 2022.

Approved for publication on October 12, 2022.

BIONOTES: **Vladimir T. Erofeev** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Architecture and Civil Engineering, Academician of the RAACS; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RISC: 161483, Scopus: 56662851300, ResearcherID: A-7827-2017, ORCID: 0000-0001-8407-8144; fac-build@adm.mrsu.ru;

Maya A. Likomaskina — postgraduate student of the Department of Building Materials and Technologies, Faculty of Architecture and Civil Engineering; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RISC: 1156302; chakichevama@list.ru;

Viktor V. Afonin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automated Information Processing and Control Systems; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RISC: 101166, Scopus: 57214232767, ResearcherID: AAB-4881-2022, ORCID: 0000-0001-7976-9792; vvafonin53@yandex.ru;

Anzelika I. Arkhipova — Candidate of Technical Sciences, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Intellectual Property Management; **Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RISC: 742901; ResearcherID: L-6923-2016; ORCID: 0000-0002-7782-2817; anzhelika_salnikova@mail.ru.

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

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 532.593:627

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1372-1380

Исследование волнового воздействия на сооружение соединительной дамбы морского угольного терминала

Наталья Владимировна Шунько, Николай Дмитриевич Зуев,
Филипп Викторович Котов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Изложены основные результаты физического моделирования волнового воздействия на гидротехнические сооружения (ГТС) объекта «Строительство морского угольного терминала на базе Сырадасайского угольного месторождения». На основании анализа экспериментальных исследований представлены рекомендации по наиболее эффективной конструкции сооружения соединительной дамбы.

Материалы и методы. Эксперименты проводились с помощью метода физического моделирования. В основе строительной науки лежат экспериментальные исследования и при научном сопровождении сооружений, в том числе и гидротехнических, физическое моделирование является наиболее приоритетным методом исследований в мировой инженерной практике. Эксперименты выполнялись в волновом лотке, входящем в состав научно-экспериментальной базы НОЦ «Гидротехника» НИУ МГСУ, с применением новейшей измерительной аппаратуры фирмы Wallingford (Великобритания). Методика исследований эффективности ГТС апробирована на большом количестве проектных сооружений, прошедших экспертизу, построенных и успешно функционирующих в настоящее время.

Результаты. По итогам экспериментальных исследований рекомендована в проект морского угольного терминала наиболее эффективная конструкция сооружения соединительной дамбы.

Выводы. Результаты данных научных исследований обеспечат реализацию строительства морского угольного терминала, возводимого в сложных природных условиях суровых арктических широт, в районе с интенсивной добычей угля (Сырадасайское угольное месторождение), что наиболее актуально для задачи развития грузовых портовых объектов Северного морского пути. Перспективы применения метода физического моделирования с задействованием в экспериментах новейшей измерительной аппаратуры и уникального лабораторного оборудования для разработки уточнений и дополнений в рекомендации нормативных документов РФ, а в ряде случаев и новых разделов, представляются актуальными.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: соединительная дамба, параметры волнения, волнограф, физическое моделирование, расчетный шторм, высотная отметка сооружения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шунько Н.В., Зуев Н.Д., Котов Ф.В. Исследование волнового воздействия на сооружение соединительной дамбы морского угольного терминала // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 10. С. 1372–1380. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1372-1380

Автор, ответственный за переписку: Наталья Владимировна Шунько, natshunko@rambler.ru.

A study of the wave action on the structure of a connecting dam at the sea coal terminal

Natalia V. Shunko, Nikolay D. Zuev, Philip V. Kotov

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

ABSTRACT

Introduction. The authors present the findings of the physical modeling of the wave impact on the hydraulic structures of the construction facility known as "An offshore coal terminal at Syradasay coal deposit". The authors have analyzed the experimental studies to provide recommendations on the most effective structural design of the connecting dam.

Materials and methods. The method of physical modeling was employed to conduct the experimental studies. Most of construction sciences are based on experimental research and, if the scientific support of structures, including those dealing with hydraulic engineering, is available, physical modeling is the top-priority research method in the international engineering practice. The experiments were conducted in a wave flume, which is a research and experimental facility at the Centre for Hydraulic Engineering Research and Education, NRU MGSU. The most advanced measurement equipment, produced by Wallingford (UK), was employed. The research methodology, used to verify the effectiveness of hydraulic structures, was tested on a large number of design structures that had been examined, built and are being successfully operated.

Results. Given the data of experimental studies, the most effective design of a connecting dam was recommended as part of the design of an offshore coal terminal.

Conclusions. The findings of this research will ensure the construction of an offshore coal terminal, which is built in difficult natural conditions typical for harsh Arctic latitudes, in the area characterized by intensive coal mining (Syradasay coal deposit), which is most relevant for the task of developing cargo port facilities along the Northern Sea Route.

KEYWORDS: connecting dam, wave parameters, wave recorder, physical modeling, design storm, building elevation

FOR CITATION: Shunko N.V., Zuev N.D., Kotov P.V. A study of the wave action on the structure of a connecting dam at the sea coal terminal. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(10):1372-1380. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1372-1380 (rus.).

Corresponding author: Natalia V. Shunko, natshunko@rambler.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Проведенные в данной работе научные исследования затрагивают вопросы, связанные со строительством новых грузовых портов в стратегически важных районах России с суровыми климатическими условиями и интенсивным грузооборотом¹.



Рис. 1. Добыча угля в районе Сырадасайского месторождения

Fig. 1. Coal mining in the area of the Syradasay deposit

Объектом исследования является проектируемая соединительная дамба морского угольного терминала на базе Сырадасайского угольного месторождения, который находится в Красноярском крае Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района на участке побережья Енисейского залива между реками Крестьянка и Рогозинка. Запасы Сырадасайского месторождения, расположенного в пределах Западно-Таймырского угленосного района, составляют около 5,7 млрд т и относятся преимущественно к жирным маркам угля (2Ж) — наиболее ценным для коксования и использования в металлургической промышленности (рис. 1). Масштабный проект включен в стратегию социально-экономического развития Арктического региона и в планы по увеличению грузопотока Северного морского пути до 80 млн т в год.

¹ О стратегии развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года : Указ Президента РФ от 26.10.2020 № 645.

Проектируемая соединительная дамба (рис. 2) предназначена для устройства проезда и технологической конвейерной эстакады, соединяющей технологический комплекс на берегу с грузовым причалом морского угольного терминала на базе Сырадасайского угольного месторождения.



Рис. 2. Сооружение соединительной дамбы протяженностью более 1,5 км соединит береговую зону и грузовой причал для отгрузки угля. Начало работы по отсыпке дамбы

Fig. 2. Construction of a connecting dam, whose length exceeds 1.5 km. It will connect the coastal zone and the cargo berth. The dam is being filled in the photo

Цель настоящей работы — изучение эффективности работы проектируемого сооружения морского угольного терминала соединительной дамбы при воздействии на нее наиболее сильного расчетного шторма.

Непосредственно климат района расположения морского угольного терминала относится к Сибирскому климатическому району Арктики, для которого характерна континентальность климата с большой амплитудой изменения температуры воздуха. Определяющее значение для климата этой приморской территории имеет влияние морей Северного Ледовитого океана — Карского и Лаптевых. Территория входит в зону арктического климата с избыточным увлажнением, коротким холодным и дождливым летом, умеренно суровой малоснежной зимой, высокой долей дней с туманами, пургой и метелями, продолжительными полярными ночами. Характерными особенностями таймырской погоды являются метели. В прибрежных районах морей период метелей длится с октября по май. Скорость ветра может достигать

45 м/с. Сильный мороз с продолжительной пургой, которая при морозе ниже -40°C даже в светлое время дня создает эффект сумерек, называют «черная пурга»².

Таким образом, погодные условия в районе возведения морского угольного терминала характеризуются как крайне «суровые»³. В этом случае период возведения сооружений, в течение которого можно производить работы, в несколько раз уменьшается. Поэтому технические решения гидротехнических сооружений (ГТС) угольного терминала ориентированы проектом на интенсивные методы проведения строительно-монтажных работ (СМР). Соответственно, крайне необходимо максимально точно определить основные параметры конструкций сооружений терминала [1, 2].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования выполнены в волновом комплексе научно-исследовательской лаборатории «Гидротехнические сооружения» НОЦ

«Гидротехника» НИУ МГСУ. В опытах было использовано оборудование фирмы HR Wallingford (Великобритания) с автоматизированной системой сбора и обработки экспериментальной информации в режиме реального времени, включающей: датчики-волнографы; 8-канальный электронный блок опроса волнографов; пакет комплексных программ для выбора режима работы, статистической обработки и визуализации данных экспериментов. Средняя квадратичная погрешность измерения высоты волны в экспериментах составляла не более $\pm 2\%$, а доверительный интервал — не менее 90 %.

При проведении экспериментальных исследований была использована стандартная методика^{4, 5} [3–8] с соблюдением подобия между натурной конструкцией и модельной по числу Фруда.

Конструкция соединительной дамбы представляет собой гравитационное насыпное сооружение откосного типа (рис. 3). Отметки дна у сооружения дамбы: от $-12,50$ до $0,00$ м БС-77. Отметка поверхности гребня соединительной дамбы $+9,00$ м для опыта № 1 и $+7,00$ м для опыта № 2.

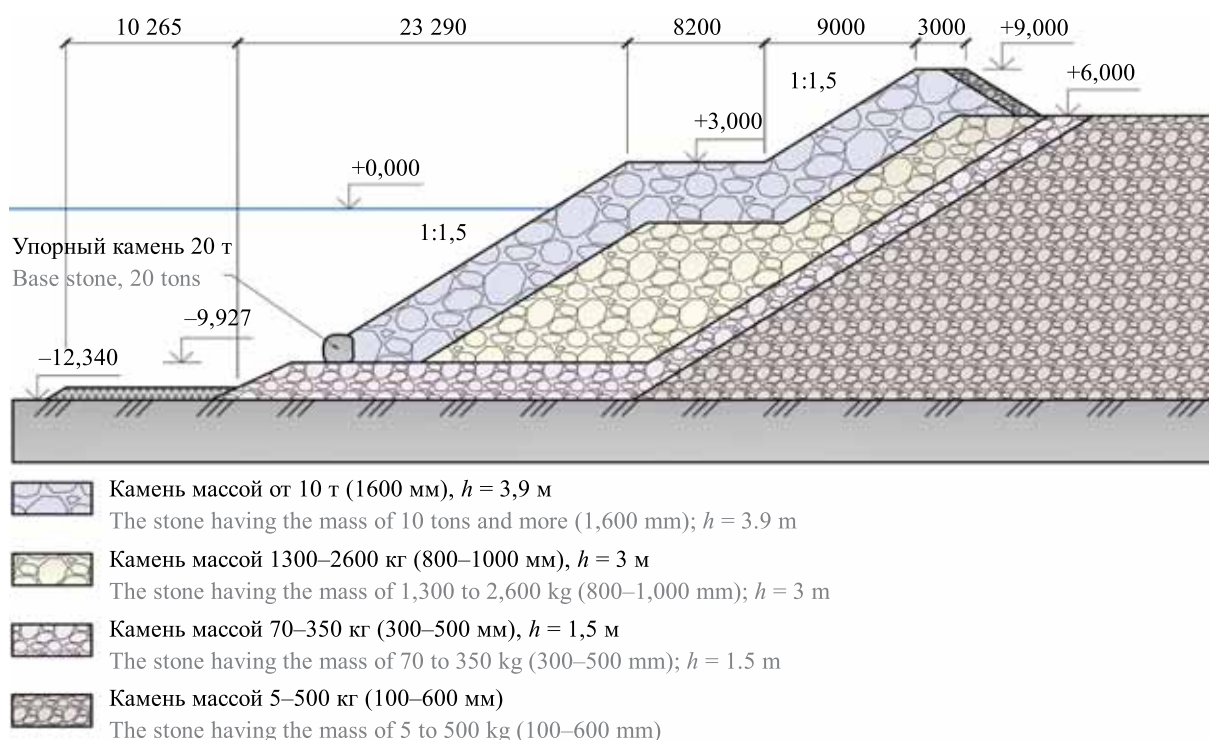


Рис. 3. Конструкция внешнего откоса соединительной дамбы

Fig. 3. Construction of the outside slope of the connecting dam

² Научно-прикладной справочник «Климат России». URL: <http://meteo.ru/pogoda-i-klimat/197-nauchno-prikladnoj-spravochnik>

³ СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*.

⁴ СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*. 2018.

⁵ ГОСТ Р 70023-2022. Физическое моделирование волновых воздействий на портовые гидротехнические сооружения. Требования к построению модели, проведению экспериментов и обработке результатов. М. : Российский институт стандартизации, 2022.

Ширина гребня дамбы 29,50 м по верху принята в соответствии со следующими требованиями:

- для обеспечения размещения технологического оборудования и устройства проезда с учетом необходимых запасов на уположение в процессе эксплуатации — 21,5 м;
- для устройства крепления откоса со стороны защищенной акватории — 1,5 м;
- для устройства крепления откоса со стороны незащищенной акватории — 6,5 м.

Отметка основания дамбы переменная в зависимости от отметки дна.

Ядро соединительной дамбы отсыпается из сортированного камня, фракции 5–500 кг. Внутренний и внешний откосы ядра дамбы формируются с уклоном 1:1,5.

Для защиты от напоязания льда на отметке +3,00 м на внутреннем и внешнем откосах дамбы устраиваются бермы шириной 8,2 м.

Защита конструкции дамбы от волнового воздействия обеспечивается внешним откосом с покрытием его слоями камня расчетной массы и диаметра. Начиная от основания дамбы от –12,34 до –7,00 м БС, откосы укрываются тремя слоями камня:

- первый слой поверх ядра дамбы укладывается из сортированного камня массой 70–350 кг. Толщина слоя 1,5 м;
- второй слой укладывается из сортированного камня массой 1300–2600 кг. Толщина слоя 3,0 м;
- третий слой укладывается из сортированного камня массой от 10,6 т. Толщина слоя 3,9 м.

С целью предотвращения сползания данного слоя предусмотрен упорный камень массой 20,0 т.

Для защиты от волнового воздействия внутренний откос укрывается двумя слоями камня:

- первый слой поверх ядра дамбы укладывается из сортированного камня массой 70–350 кг. Толщина слоя 1,5 м;
- второй слой укладывается из сортированного камня массой 1300–2600 кг. Толщина слоя 3,0 м.

Для защиты внешнего откоса дамбы от волнового воздействия на отметках дна в основании дамбы от –7,00 до 0,00 м также предусмотрены три слоя камня:

- первый слой поверх ядра дамбы укладывается из сортированного камня массой 70–350 кг. Толщина слоя 1,5 м;
- второй слой укладывается из сортированного камня массой 1300–2600 кг. Толщина слоя 3,0 м;
- третий слой укладывается из сортированного камня массой от 10,6 т. Толщина слоя 3,9 м.

Масштаб физической модели сооружения соединительной дамбы в опытах составил 1:50.

Цель экспериментов состояла в исследовании:

- величины волнового заплеска на сооружение дамбы;
- устойчивости каменной наброски сооружения дамбы и размеров камня;

- рекомендуемой высотной отметки сооружения дамбы при условии предотвращения возможности заплесков волн.

К обязательным волновым воздействиям на морские гидротехнические сооружения при исследовании работы конструкций на основе проведения физического моделирования относится определение величины заплеска (наката) волн на сооружение. Волновой заплеск устанавливает положение отметок их надводных частей над расчетным уровнем воды, чтобы гребень расчетной волны в системе расчетного шторма не препятствовал нормальной эксплуатации сооружений⁶ [9–12].

В случае наличия в составе ГТС проекта откосных конструкций с защитной наброской из камня необходимо исследовать устойчивость элементов наброски с целью подбора их массы для обеспечения устойчивости набросного покрытия откоса [13–15].

При необоснованном завышении верхних отметок будет увеличиваться стоимость сооружений, а при занижении возможны переливы воды, обледенение и аварии [9, 10].

В данной работе всего проведено два опыта.

Волновые параметры шторма северо-западного направления 1 % обеспеченности повторяемостью 1 раз в 50 лет составили значения: $h_1 \% = 4,4$ м, $T_{cp} = 6,07$ с. Уровень воды макс. 5 %: +0,94 м БС. Отметка дна у выбранного характерного сечения сооружения: –11,365 м БС. Все приведенные в статье параметры указаны в натуральных величинах без пересчета на модель.

В опытах в волновом лотке волнограф № 1 (B1) устанавливался на расстоянии 8 м до модели дамбы (рис. 4) ближе к волнопродуктору для контроля соответствия генерируемых параметров волнения, заданных в начале опыта. Волнограф № 2 (B2) устанавливался у модели сооружения дамбы для фиксации результирующей волны.



Рис. 4. Датчики-волнографы в рабочем положении
Fig. 4. Sensors-wave recorders in the working position

⁶ Ferry developments and their consequences for ports. Recommendations for the design and operation of port facilities. Permanent International Association of Navigation Congresses, 2014. 118 p.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования в опыте № 1 приведены на рис. 5.

Реализация датчика волнографа В1 в процессе эксперимента представлена на рис. 6.



Рис. 5. Отсутствие волнового заплеска на верхнюю отметку дамбы в опыте № 1. Параметры волн на подходе к сооружению дамбы: $h_1 \% = 4,4$ м, $T_{cp} = 6,07$ с

Fig. 5. No wave oversplashes reach the top level of the dam in Experiment 1. Wave parameters close to the dam structure are: $h_1 \% = 4.4$ m, $T_{av} = 6.07$ s

Данные инструментальных измерений
Instrument output

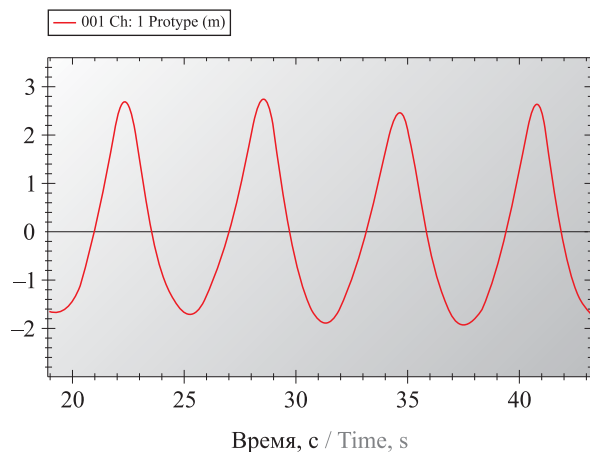


Рис. 6. Колебания волновой поверхности в опыте № 1 (показания волнографа В1). Параметры волн на подходе к сооружению дамбы: $h_1 \% = 4,4$ м, $T_{cp} = 6,07$ с

Fig. 6. Oscillations of the wave surface in Experiment 1 (readings of wave recorder B1). Wave parameters close to the dam structure are: $h_1 \% = 4.4$ m, $T_{av} = 6.07$ s

Реализация датчика волнографа В2 (у сооружения дамбы) в процессе эксперимента показана на рис. 7. Высота волны у сооружения дамбы составила в экспериментах $h = 4,90$ м. Гребень волны фиксировался на высоте +3,00 м БС. Волновой заплеск должен по-

явиться на отметке: $+3,00 + 0,94 = +3,94$ м БС. Так как проектная отметка верха дамбы составляла +9,00 м, волновой заплеск на верхнюю отметку модели дамбы отсутствовал.

Данные инструментальных измерений
Instrument output

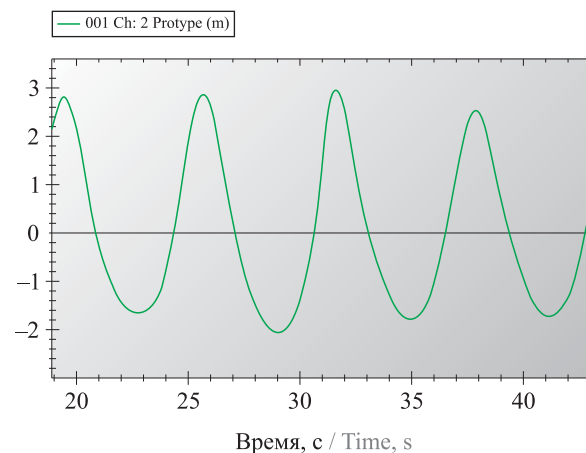


Рис. 7. Колебания волновой поверхности в опыте № 1 (показания волнографа В2), высота волны $h = 4,90$ м

Fig. 7. Oscillations of the wave surface in Experiment 1 (readings of wave recorder B2), wave height $h = 4.90$ m

Состояние откоса сооружения дамбы после эксперимента и слива воды из волнового лотка приведено на рис. 8. Сброса камня защитной наброски в процессе экспериментов не было.



Рис. 8. Отсутствие сброса камня защитной наброски в опыте № 1

Fig. 8. No stones are thrown off the protective rockfill in Experiment 1

Результаты опыта № 1

На основании анализа результатов экспериментов по воздействию расчетного шторма от северо-западного направления на конструкцию сооружения соединительной дамбы в эксплуатационный период установлено:

- отсутствие волнового заплеска на верхнюю отметку дамбы;
- отсутствие перелива гребней расчетных волн через верхнее строение конструкции дамбы;
- отсутствие сброса элементов каменной защитной наброски в опыте № 1;
- проектная высотная отметка сооружения дамбы дана с запасом.

По итогам проведенного опыта № 1 и его анализа следует вывод, что на ГТС соединительной дамбы морского угольного терминала на базе Сырадасайского угольного месторождения расчетный шторм (СЗ румба) не оказывает разрушающего воздействия, а проектное сооружение дамбы морского терминала демонстрирует эффективную работу в эксплуатационный период. Стоит отметить, что проектная отметка верха дамбы (+9,00 м) завышена и для условий данного сооружения соединительной дамбы она, с учетом полученной в экспериментах высоты заплеска, вполне может составить высотное значение +7,00 м.

Принимая во внимание значительную продолжительность сооружения соединительной дамбы и рекомендацию по снижению высотной отметки на 2,0 м, получаем уменьшение стоимости возведения данного сооружения и сокращение сроков проведения СМР в крайне тяжелых погодных условиях.

Таким образом, необходимо проверить работу сооружения дамбы с высотной отметкой +7,00 м.

В опыте № 2 на физической модели исследовано сооружение дамбы с высотной отметкой +7,00 м (рис. 9). Условия эксперимента были такими же, как и в предыдущем опыте № 1.



Рис. 9. Экспериментальные исследования с высотной отметкой сооружения дамбы +7,00 м. Волновой заплеск отсутствует

Fig. 9. Experimental studies at the elevation of the dam construction: +7.00 m. No wave oversplash

На основании анализа результатов проведенных экспериментальных исследований можно сделать выводы.

1. Рекомендована в проект морского угольного терминала наиболее эффективная конструкция сооружения соединительной дамбы, позволяющая обеспе-

чить возведение морского угольного терминала с уменьшением сроков СМР и снижением стоимости строительства в сложных природных условиях суровых арктических широт.

2. Доказана необходимость и обязательность проведения физического моделирования работы проектного гидротехнического сооружения в составе научного сопровождения строительства [16–19].

3. На примере проектного сооружения соединительной дамбы, рассчитанной инженерными методами с применением актуальных нормативных документов, показана недостаточность их рекомендаций для разработки наиболее оптимального варианта конструкции ГТС [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Воздействие ветровых волн на морские ГТС представляет собой весьма сложный процесс, связанный с многообразием исходных данных, подлежащих учету на различных стадиях выполнения проекта. В основных нормативных документах, в частности СП 38.13330.2018, рассмотрены не все расчетные сценарии взаимодействия волн и сооружений. Возможны ситуации, когда отсутствуют рекомендации для расчета сооружения, конструкция которого или регион эксплуатации не встречались ранее в проектной практике. Сложность проектирования ГТС связана так же с необходимостью учета взаимовлияния различных факторов на работу таких сооружений, которые в каждом новом районе строительства существенно отличаются друг от друга. Следует отметить уникальность и неповторимость по ряду признаков конструкций ГТС, что вносит свои сложности в проектные расчеты. Особенно актуально это для северных районов нашей страны, где в последнее время идет оживленное строительство грузовых причальных линий в составе морских перегрузочных комплексов природных ресурсов в очень сложных природных условиях. НИУ МГСУ регулярно осуществляет научное сопровождение подобных объектов, в том числе и с применением обширной научно-экспериментальной базы для выполнения физического моделирования^{7,8} [16, 17]. Кроме всего вышесказанного, требуется добавить, что и многие

⁷ Отчет о НИР «Физическое моделирование воздействия ветровых волн на объекте: “Создание сухогрузного района морского порта Тамань” (объекты федеральной собственности) (мыс Тузла, Таманский п-ов, Краснодарский край). Этап 2. Объекты федеральной собственности, необходимые для обеспечения деятельности сухогрузного района морского порта Тамань». Арх. № 103629/Р.601-19. М. : НИУ МГСУ, 2019.

⁸ Отчет о НИР «Проверка результатов расчетов определения отметки кордона участков № 1–3 причальной набережной по объекту “Терминал сжиженного природного газа и стабильного газового конденсата «Утренний»». Арх. 105017/Р.528-21. НИУ МГСУ. М., 2021.

расчетные зависимости в действующих нормативах выводились преимущественно эмпирическим путем, причем достаточно давно. В связи с этим необходимо их дополнительное уточнение с проведением крупномасштабных экспериментальных исследований с применением современной точной измерительной аппаратуры.

Перспективы применения метода физического моделирования с задействованием в экспериментах новейшей измерительной аппаратуры и уникального лабораторного оборудования для разработки уточнений и дополнений в рекомендации нормативных документов РФ, а в ряде случаев и новых разделов, представляются актуальными.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рогачко С.И. Проблемы проектирования морских портов в северных широтах // Гидротехника. 2020. № 4 (61). С. 36–39.
2. Мирзоев Д.А. Морские нефтегазопромысловые гидротехнические сооружения — актуальные проблемы и перспективы развития // Гидротехника. 2021. № 4 (65). С. 5–9.
3. Age C. Model testing — bringing the ocean into the laboratory // Proceedings of the 2. Hydralab Workshop on Problems and Challenges in Experimental Research. 1999.
4. Aziz Tayfun M. Sampling-rate errors in statistics of wave heights and periods // Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 1993. Vol. 119. Issue 2. Pp. 20–26. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1993)119:2(172)
5. Kantardgi I.G., Zheleznyak M.J. Laboratory and numerical study of waves in the port area // Magazine of Civil Engineering. 2016. Vol 66. Issue 6. Pp. 49–59. DOI: 10.5862/MCE.66.5
6. Нуднер И.С., Семенов К.К., Лебедев В.В., Хакимзянов Г.С., Захаров Ю.Н. Численная модель гидроволновой лаборатории для исследования взаимодействия морских волн с гидротехническими сооружениями // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24. № 1. С. 86–105. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.1.007
7. Perrott D. How to determine analogue sampling system parameters. Based on Instrument Users' Note No. 54, May 1984. Internal memo, HR Wallingford, Dec. 1992. Pp. 41–47.
8. Frostick L.E., McLelland S.J., Mercer T.G. Users guide to physical modelling and experimentation. London : Taylor & Francis Group, 2011. 274 p. DOI: 10.1201/b11335
9. Рогачко С.И., Шунько Н.В. Научное сопровождение проектов морских гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2021. № 11. С. 5–10.
10. Шунько Н.В. Волновой накат и устойчивость для сооружений откосного профиля с закрепленным и незакрепленным проницаемым покрытием : дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 22 с.
11. Davies M., MacDonald N., Cornett A. Optimization of port design using physical modeling // America's Ports — Gateways to the Global Economy. 2001. P. 16.
12. De Finis S., Romano A., Bellotti G. Numerical and laboratory analysis of post-overtopping wave impacts on a storm wall for a dike-promenade structure // Coastal Engineering. 2020. Vol. 155. P. 103598. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2019.103598
13. Roušar L., Zachoval Z., Julien P. Incipient motion of coarse uniform gravel // Journal of Hydraulic Research. 2016. Vol. 54. Issue 6. DOI: 10.1080/00221686.2016.1212286
14. Tamrin P.S., Parung H., Thaha A. Experimental study of perforated concrete block breakwater // International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS. 2014. Vol. 14. Pp. 6–10.
15. Brown C.T., Dentale F. Variable distribution of armour on seawalls and breakwaters // Proceedings of a conference on Coasts, Marine Structures and Breakwaters. 2013. Pp. 1–10.
16. Зуев Н.Д., Шахин В.М., Шунько А.С., Шунько Н.В. Исследование трансформации волн на подходе к морскому порту Тамань и в его акватории с учетом основных определяющих волнение факторов // Гидротехническое строительство. 2022. № 6. С. 54–59.
17. Zuev N.D., Shun'ko A.S., Shun'ko N.V. Investigation of coefficient of reflection of waves produced by a rock-fill inclined bank protection structure // Power Technology and Engineering. 2019. Vol. 53. Issue 1. Pp. 29–32. DOI: 10.1007/s10749-019-01029-5
18. Шахин В.М., Бакланов А.А., Радионов А.Е. Объемные подпричальные волногасители // Гидротехника. 2018. № 4 (53). С. 30–31.
19. Макаров К.Н., Макаров Н.К. Моделирование оградительных сооружений порта Мзымтинского в Адлерском районе г. Сочи // Вестник МГСУ. 2010. № 1. С. 50–54.

Поступила в редакцию 3 июня 2022 г.

Принята в доработанном виде 14 июля 2022 г.

Одобрена для публикации 1 октября 2022 г.

О Б АВТОРАХ: **Наталья Владимировна Шунько** — кандидат технических наук, руководитель НОЦ «Гидротехника» — заведующая НИЛ «Гидротехнические сооружения»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 22255075, Scopus: 57191531249, ResearcherID: AAE-9024-2022, ORCID: 0000-0002-2967-9710; natshunko@rambler.ru;

Николай Дмитриевич Зуев — кандидат технических наук, заведующий сектором измерений НИЛ «Гидротехнические сооружения» НОЦ «Гидротехника»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; nd43zuev@yandex.ru;

Филипп Викторович Котов — преподаватель кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 675643, ORCID: 0000-0003-2806-9635; filipp_net@mail.ru.

Вклад авторов:

Шунько Н.В. — идея, концепция исследования, развитие методики исследований, руководство и организация проведения экспериментов, написание статьи, научное редактирование текста.

Зуев Н.Д. — развитие методики исследований, разработка методики строительства физической модели, подготовка и отладка измерительной аппаратуры, проведение экспериментов, научное редактирование текста.

Котов Ф.В. — развитие методики исследований, разработка методики строительства физической модели, строительство физической модели, проведение экспериментов, редактирование текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Rogachko S.I. Possible challenges in designing of seaports in north polar region. *Hydrotechnics*. 2020; 4(61):36-39. (rus.).
2. Mirzoyev D.A. Current challenges and development prospects of offshore oil and gas hydrotechnical facilities. *Hydrotechnics*. 2021; 4(65):5-9. (rus.).
3. Aage C. Model testing — bringing the ocean into the laboratory. *Proceedings of the 2. Hydralab Workshop on Problems and Challenges in Experimental Research*. 1999.
4. Aziz Tayfun M. Sampling-rate errors in statistics of wave heights and periods. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. 1993; 119(2):20-26. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1993)119:2(172)
5. Kantardgi I.G., Zheleznyak M.J. Laboratory and numerical study of waves in the port area. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 6(66):49-59. DOI: 10.5862/MCE.66.5
6. Nudner I.S., Semenov K.K., Lebedev V.V., Khakimzyanov G.S., Zakharov Y.N. Numerical model of the hydrowave laboratory for studying the interaction of sea waves with hydrotechnical structures. *Computational Technologies*. 2019; 24(1):86-105. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.1.007 (rus.).
7. Perrott D. *How to determine analogue sampling system parameters*. Based on Instrument Users' Note No. 54, May 1984. Internal memo, H.R. Wallingford, Dec. 1992; 41-47.
8. Frostick L.E., McLelland S.J., Mercer T.G. *Users Guide to Physical Modelling and Experimentation*. London, Taylor & Francis Group, 2011; 274. DOI: 10.1201/b11335
9. Rogachko S.I., Shunko N.V. Scientific support of projects of offshore hydraulic structures. *Hydrotechnical Construction*. 2021; 11:5-10. (rus.).
10. Shunko N.V. *Wave run-up and stability for slope profile structures with fixed and loose permeable coating : abstract for the competition cand. tech. sciences*. Moscow, 2015; 22. (rus.).
11. Davies M., MacDonald N., Cornett A. Optimization of port design using physical modeling. *America's Ports — Gateways to the Global Economy*. 2001; 16.
12. De Finis S., Romano A., Bellotti G. Numerical and laboratory analysis of post-overtopping wave impacts on a storm wall for a dike-promenade structure. *Coastal Engineering*. 2020; 155:103598. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2019.103598
13. Roušar L., Zachoval Z., Julien P. Incipient motion of coarse uniform gravel. *Journal of Hydraulic Research*. 2016; 54(6). DOI: 10.1080/00221686.2016.1212286
14. Tamrin P.S., Parung H., Thaha A. Experimental Study of Perforated Concrete Block Breakwater. *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*. 2014; 14:6-10.
15. Brown C.T., Dentale F. Variable distribution of armour on seawalls and breakwaters. *Proceedings of a conference on Coasts, Marine Structures and Breakwaters*. 2013; 1-10.
16. Zuev N.D., Shakhin V.M., Shunko A.S., Shunko N.V. Investigation of wave transformation on

the approach to the seaport of Taman and in its water area, taking into account the main factors determining waves. *Hydraulic Engineering*. 2022; 6:54-59. (rus.).

17. Zuev N.D., Shun'ko A.S., Shun'ko N.V. Investigation of coefficient of reflection of waves produced by a rock-fill inclined bank protection structure. *Power Technology and Engineering*. 2019; 53(1):29-32. DOI: 10.1007/s10749-019-01029-5

18. Shakhin V.M., Baklanov A.A., Radionov A.E. Volumetric berthing wave dampers. *Hydrotechnics*. 2018; 4(53):30-31. (rus.).

19. Makarov K.N., Makarov N.K. Modeling of protective structures of the port of Mzymtinsky in the Adler district of Sochi. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2010; 1:50-54. (rus.).

Received June 3, 2022.

Adopted in revised form on July 14, 2022.

Approved for publication on October 1, 2022.

B I O N O T E S: **Natalia V. Shunko** — Candidate of Technical Sciences, Head of the scientific and educational center “Hydrotechnics” — head of the research laboratory “Hydrotechnical structures”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 22255075, Scopus: 57191531249, ResearcherID: AAE-9024-2022, ORCID: 0000-0002-2967-9710; natshunko@rambler.ru;

Nikolay D. Zuev — Candidate of Technical Sciences, Head of the Measurement Sector of the Scientific Research Laboratory “Hydraulic Engineering Structures” of the scientific and educational center “Hydrotechnics”; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; nd43zuev@yandex.ru;

Filipp V. Kotov — Lecturer at the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 675643, ORCID: 0000-0003-2806-9635; filippnet@mail.ru.

Contribution of the authors:

Natalia V. Shunko — idea, concept of research, development of research methodology, management and organization of experiments, writing an article, scientific editing of the text.

Nikolay D. Zuev — development of research methods, development of methods for building a physical model, preparation and debugging of measuring equipment, conducting experiments, scientific editing of the text.

Filipp V. Kotov — development of research methodology, development of a methodology for building a physical model, building a physical model, conducting experiments, editing the text.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER
УДК 517.392 : 517.583 : 556.301
DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1381-1388

Расчет полных эллиптических интегралов третьего рода в прикладных исследованиях

Кошкинбай Назирович Анахаев

*Институт прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра
Российской академии наук (ИПМА КБНЦ РАН); г. Нальчик, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. При проведении теоретических и прикладных исследований по моделированию гидрогеофизических фильтрационных процессов и других потенциальных потоков нередко возникает необходимость аналитического определения значений «неберущихся» эллиптических интегралов, что связано с трудоемкими математическими подсчетами, перекрестным нелинейным интерполированием данных специальных таблиц и графиков и др. Использование при решении прикладных задач для их определения компьютерных программ дает только дискретные результаты в «цифрах» (а не в «символах») без возможности их последующих преобразований для получения общего аналитического решения в элементарных функциях.

Материалы и методы. Несмотря на наличие различных вычислительных программ, аналитические решения востребованы до настоящего времени, поскольку имеют большие возможности по выявлению внутренних физических причинно-следственных связей в решаемых задачах и последующего их использования в математических преобразованиях.

Результаты. Предложены расчетные зависимости в элементарных функциях по определению значений полного эллиптического интеграла 3-го рода с достаточной точностью ($\sim < 2-4\%$) для проведения прикладных (и теоретических) исследований.

Выводы. Выполнено сравнение полученных результатов с точными данными программы Mathcad для широкого интервала изменений параметра интеграла и теоретических решений Л. Милн-Томсона. Приведенный анализ позволяет рекомендовать полученные расчетные зависимости в элементарных функциях для определения значений полного эллиптического интеграла 3-го рода как в прикладных, так и теоретических исследованиях в различных областях науки и техники.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: потенциальные потоки, эллиптические интегралы, полный эллиптический интеграл 3-го рода, модулярный угол, параметр интеграла, таблицы эллиптических интегралов

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИПМА КБНЦ РАН № 122041800015-8.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Анахаев К.Н. Расчет полных эллиптических интегралов третьего рода в прикладных исследованиях // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 10. С. 1381–1388. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1381-1388

Автор, ответственный за переписку: Кошкинбай Назирович Анахаев, anaha13@mail.ru.

To calculation of full elliptic integrals third sorts in applied researches

Koshkinbai N. Anakhaev

Institute of Applied Mathematics and Automation of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; Nalchik, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. When carrying out theoretical and applied researches on modeling of hydrogeophysical filtration processes and other potential streams quite often there is a need of analytical determination of values of “impossible” elliptic integrals that is connected with labor-consuming mathematical calculations, cross nonlinear interpolating of these special tables and schedules, etc. Use at the solution of applied tasks for their definition of computer programs yields only discrete results in “figures” (but not in “symbols”) without a possibility of their subsequent transformations for receiving the common analytical decision in elementary functions.

Materials and methods. Therefore, despite existence of various computing programs, analytical decisions are demanded so far as they have great opportunities for identification of internal physical relationships of cause and effect in solvable tasks and the subsequent their use in mathematical transformations.

Results. In work estimated dependences in elementary functions by determination of values of full elliptic integral 3rd sorts with a sufficient accuracy ($\sim < 2-4\%$) for carrying out applied (and theoretical) researches are offered.

Conclusions. L. Milne-Thomson is brought comparison of the received results with exact data of the Mathcad program for a wide interval of changes of parameter of integral and theoretical decisions.

KEYWORDS: potential streams, elliptic integrals, full elliptic integral 3 sorts, modular corner, parameter of integral, table of elliptic integrals

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the State Assignment of the Institute of Applied Mathematics and Automation of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences No. 122041800015-8.

FOR CITATION: Anakhaev K.N. To calculation of full elliptic integrals third sorts in applied researches. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(10):1381-1388. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.0000-1381-1388 (rus.).

Corresponding author: Koshkinbai N. Anakhaev, anaha13@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

При проведении теоретических и прикладных исследований по моделированию гидрогеофизических фильтрационных процессов и других потенциальных потоков нередко возникает необходимость аналитического определения значений «неберущихся» эллиптических интегралов 3-го рода, что связано с трудоемкими математическими подсчетами, перекрестным нелинейным интерполированием данных специальных таблиц и графиков, и др. В частности, эллиптические интегралы 3-го рода возникают при расчете:

- напорной фильтрации под заглубленным прямоугольным флютбетом при ограниченной мощности основания [1, с. 153];
- напорной фильтрации под флютбетом с двумя шпунтами [2];
- напорной фильтрации под несимметричным флютбетом с двумя шпунтами [3];
- напорной фильтрации под заглубленным несимметричным флютбетом с двумя шпунтами разной длины [4];
- напорной фильтрации под заглубленным прямоугольным флютбетом на двухслойном основании с сильнопроницаемым нижним слоем [5];
- напорной фильтрации в котлован, огражденный шпунтами при сильнопроницаемом подстилающем слое основания [6];
- безнапорной профильной фильтрации из источника в почвенном слое при сильнопроницаемом подстилающем слое основания [7];
- безнапорной обходной (плановой) фильтрации в месте сопряжения бетонной и грунтовой плотин с несимметрично расположенным противофильтрационным элементом [8].

При этом полные эллиптические интегралы 3-го рода $\Pi(n/\alpha)$ в тригонометрической форме Лежандра имеют вид [9–12]:

$$\Pi(n/\alpha) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{(1 - n \cdot \sin^2 \varphi) \sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cdot \sin^2 \varphi}}, \quad (1)$$

где n — параметр (характеристика) интеграла; α — модулярный угол; φ — амплитуда интеграла.

Рассматриваемый интеграл (1) является «неберущимся» и аналитическое определение его значений связано с трудоемкими математическими подсчетами, необходимостью перекрестного нелинейного интерполирования данных специальных таблиц и графиков и др.

При этом известные приближенные зависимости по вычислению этих интегралов не охватывают всей области определения аргументов, представлены громоздкими формулами по аппроксимации различных рядов или сводятся к вычислениям с использованием таких же «неберущихся» (но табулированных) эллиптических интегралов 1-го и 2-го родов [12–15]. Кроме этого, в существующих таблицах прямого определения [11, 16, 17] значения эллиптического интеграла 3-го рода представлены либо только для единичного интервала параметра n (с отсутствием отрицательных значений), либо с недопустимо крупным шагом его разбиения [14] и др.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использование при решении прикладных задач для определения значений эллиптических интегралов различных компьютерных программ позволяет получать только дискретные значения интегралов для каких-то отдельных точек или фрагментов задачи в «цифрах», а не в математических символах с возможностью последующих их преобразований (дифференцирования, интегрирования). То есть при этом мы не можем получить общее аналитическое решение в элементарных функциях для всей области задачи и ограничены в возможностях выявления причинно-следственных связей (в виде аналитических формул) исходных факторов и оценке их влияния на итоговые результаты. В связи с этим в настоящей работе излагается новое прямое приближенно-гидромеханическое решение указанной задачи с представлением итоговых результатов в элементарных функциях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ниже приводятся усовершенствованные аналитические зависимости по расчету значений полных эллиптических интегралов 3-го рода $\Pi(n/\alpha)$ в элементарных функциях, позволяющие получать достаточно точные результаты (в основном $\ll 2-4\%$) на базе формулы [18]:

$$\Pi(n/\alpha) = \frac{K(\alpha)}{\sqrt{1-n}} \left\{ 1 + n \left[1 - \sqrt{1 - (1+3n) \left(\frac{\alpha}{180} \right)^2} \right] \right\}, \quad (2)$$

как для прикладных, так и теоретических исследований, основанные на предыдущих работах [19–22] для дифференцированных интервалов изменения параметра n .

Значения параметра $0 \leq n < 1$

Интервал значений $0 \leq n < \sin^2 \alpha$ — гиперболический случай [11].

Для данного случая значения полного эллиптического интеграла 3-го рода $\Pi(n/\alpha)$ рекомендуется определять по зависимостям:

- при значении модулярного угла (в градусах) $0 \leq \alpha \leq 65$ (т.е. $0 \leq n \leq 0,821$):

$$\Pi(n/\alpha) = \frac{K(\alpha)}{\sqrt{1-n}} \left\{ 1 + n \left[1 - \sqrt{1 - (1+3n) \left(\frac{\alpha}{180} \right)^2} \right] \right\} h_1, \quad (3)$$

где $K(\alpha)$ — полный эллиптический интеграл 1-го рода, находится по формуле [18–22]:

$$K(\alpha) = \frac{\pi}{2} + \frac{\ln(\cos \alpha)}{\ln[0,35 \cdot (1 - 0,2 \cdot \cos \alpha)]}, \quad (4)$$

где h_1 — коэффициент, определяемый по зависимостям:

$$h_1 = 1 - (1 - f_1) \frac{\alpha}{65},$$

$$f_1 = 1 - 0,0035n; \quad (5)$$

- при значениях модулярного угла $65 \leq \alpha < 90$ и параметра $0 \leq n \leq 0,821$ величина эллиптического интеграла $\Pi(n/\alpha)$ также находится по формуле (3), в которую вместо h_1 подставляется коэффициент h_2 , равный:

$$h_2 = f_2 - (f_2 - f_1) \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha - 65}{25} \right)^2},$$

$$f_2 = 1 + 0,12n; \quad (6)$$

- при значениях модулярного угла $65 \leq \alpha < 90$ и параметра $0,821 \leq n < 1$ в формулу (3) вместо h_1 подставляется коэффициент h_3 , равный:

$$h_3 = f_4 - (f_4 - f_3) \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{90 - \alpha_0} \right)^2},$$

$$f_3 = \frac{E(\alpha_0)}{\cos^2(\alpha_0) \cdot \Pi(n/\alpha_0)},$$

$$f_4 = 2,6 - 1,4 \sqrt{1 - (5n - 4)^2}, \quad (7)$$

где $\alpha_0 = \arcsin \sqrt{n}$ — угол на кривой $n = \sin^2 \alpha$, соответствующий заданному значению параметра n ; $E(\alpha_0)$ — полный эллиптический интеграл 2-го рода, определяемый для угла α_0 по формуле [18–20, 22]:

$$E(\alpha_0) = \ln \sqrt{e^\pi - (e^\pi - e^2) \sin^2 \alpha_0}. \quad (8)$$

В выражении (7) величина $\Pi(n/\alpha)$ находится по формуле (2), подсчитанная, как и значение полного эллиптического интеграла 1-го рода $K(\alpha_0)$ по формуле (4) при угле α_0 .

Интервал значений $\sin^2 \alpha \leq n < 1$ — круговой случай [11].

Для данного интервала значений полный эллиптический интеграл 3-го рода $\Pi(n/\alpha)$ определяется по зависимостям:

- при значениях модулярного угла $0 \leq \alpha < 65$ и параметра $\sin^2 \alpha \leq n \leq 0,821$ величина эллиптического интеграла $\Pi(n/\alpha)$ находится по формуле (3), в которую вместо h_1 подставляется коэффициент h_4 , равный:

$$h_4 = 1 - (1 - f_5) \frac{\alpha}{65},$$

$$f_5 = 1 - 0,01n(1 + \pi n); \quad (9)$$

- при значениях модулярного угла $0 \leq \alpha < 65$ и параметра $0,821 \leq n < 1$ для определения эллиптического интеграла $\Pi(n/\alpha)$ в формулу (3) вместо h_1 подставляется коэффициент h_5 , равный:

$$h_5 = 1 - (1 - f_6) \frac{\alpha}{65},$$

$$f_6 = 1,11 - 0,135 \sqrt{1 - (5n - 4)^2}; \quad (10)$$

- при значениях модулярного угла $65 \leq \alpha < 90$ и параметра $0,821 \leq n < 1$ в формулу (3) вместо h_1 подставляется коэффициент h_6 , равный:

$$h_6 = f_3 - (f_3 - f_6) \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha - 65}{\alpha_0 - 65} \right)^2}. \quad (11)$$

Частные значения параметра $n = 0; 1; \sin^2 \alpha$.

Для частных значений параметра n величина полного эллиптического интеграла 3-го рода $\Pi(n/\alpha)$ определяется по зависимостям:

$$\left. \begin{aligned} \text{при } n = 0 \quad \Pi(0/\alpha) &= K(\alpha) = \frac{\pi}{2} + \frac{\ln(\cos \alpha)}{\ln[0,35 \cdot (1 - 0,2 \cdot \cos \alpha)]}, \quad \Pi(0/0) = \frac{\pi}{2}; \\ \text{при } n = 1 \quad \Pi(1/\alpha) &= \infty; \\ \text{при } n = \sin^2(\alpha) \quad \Pi(\sin^2 \alpha / \alpha) &= \frac{E(\alpha)}{\cos^2 \alpha} = \frac{\ln \sqrt{e^\pi - (e^\pi - e^2) \cdot \sin^2 \alpha}}{\cos^2 \alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Значения параметра $1 < n \leq 100$

(гиперболический случай [11])

Для данного интервала изменений $1 < n \leq 100$ с учетом замены параметра n на величину [11] $N_1 = (\sin^2 \alpha) / n$ и последующих преобразований име-

ем следующие расчетные зависимости для определения значений полного эллиптического интеграла 3-го рода $\Pi(n/\alpha)$ в виде:

$$\Pi(n/\alpha) = [K(\alpha) - \Pi(N_1/\alpha)]\sigma_1, \quad (13)$$

где

$$\Pi(N_1/\alpha) = \frac{K(\alpha)}{\sqrt{1-N_1}} \left\{ 1 + N_1 \left[1 - \sqrt{1 - (1+3N_1) \left(\frac{\alpha}{180^\circ} \right)^2} \right] \right\}. \quad (14)$$

Величина коэффициента σ_1 в выражении (13) определяется по формулам.

Для параметра $1 < n \leq 20$:

$$\left. \begin{aligned} &\text{при } 0 \leq \alpha \leq 30 \quad \sigma_1 = 1; \\ &\text{при } 30 < \alpha \leq 65 \quad \sigma_1 = 1 + \frac{\alpha - 30}{35} (n^{0,025} - 1,042); \\ &\text{при } 65 < \alpha < 90 \quad \sigma_1 = 1,04n^{0,025} \left[0,91 + \frac{\alpha - 65}{25} (n^{0,050} - 0,91) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Для параметра $20 < n \leq 100$:

$$\left. \begin{aligned} &\text{при } 0 \leq \alpha \leq 65 \quad \sigma_1 = 1 + \frac{\alpha}{65} (1,025n^{0,0055} - 1); \\ &\text{при } 65 < \alpha < 90 \quad \sigma_1 = 1,025n^{0,0055} \left[1 + \frac{\alpha - 65}{25} (1,20n^{0,0055} - 1) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Значения параметра $-100 \leq n < 0$

(круговой случай [11])

Для данного интервала изменений $-100 \leq n < 0$ с учетом замены параметра n на величину [11] $N_2 = (\sin^2 \alpha - n) / (1 - n)$ и последующих преобразований имеем следующие зависимости для определе-

ния значений эллиптического интеграла $\Pi(n/\alpha)$ в виде:

$$\Pi(n/\alpha) = \left[\frac{-n \cdot \cos^2 \alpha \cdot \Pi(N_2/\alpha)}{(1-n)(\sin^2 \alpha - n)} + \frac{\sin^2 \alpha \cdot K(\alpha)}{\sin^2 \alpha - n} \right] \sigma_2, \quad (17)$$

где

$$\Pi(N_2/\alpha) = \frac{K(\alpha)}{\sqrt{1-N_2}} \left\{ 1 + N_2 \left[1 - \sqrt{1 - (1+3N_2) \left(\frac{\alpha}{180^\circ} \right)^2} \right] \right\}. \quad (18)$$

Величина коэффициента σ_2 в выражении (17) рассчитывается по формулам:

$$\left. \begin{aligned} &\text{при } 0 \leq \alpha \leq 65 \quad \sigma_2 = 1 + (\pi - 3) \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{65} \right)^2} \right] \sqrt{1 - \left(1 + \frac{n}{100} \right)^2}; \\ &\text{при } 65 < \alpha < 90 \quad \sigma_2 = 1 + \sqrt{1 - \left(1 + \frac{n}{100} \right)^{1,5}} \left\{ \pi - 1 - 2 \left[1 - \left(\frac{\alpha - 65}{25} \right)^2 \right]^{0,575} \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

В таблице приводится сравнение значений полного эллиптического интеграла 3-го рода $\Pi(n/\alpha)$, подсчитанных по предлагаемым элементарным аналитическим зависимостям (3)–(19) с точными данными, полученными по программе Mathcad.

Как следует из таблицы, сравнение расчетных значений полного эллиптического интеграла 3-го рода $\Pi(n/\alpha)$, подсчитанных по предлагаемым элементарным аналитическим зависимостям (3)–(19), с точными данными (программы Mathcad) дает вполне приемлемое совпадение результатов ($\sim < 2-4\%$).

Некоторое завышение расхождений данных проявляется при $n \rightarrow 1$ и $\alpha \rightarrow 90$, при которых значения эллиптического интеграла стремятся к бесконечности $\Pi(n/\alpha) \rightarrow \infty$ и требуется их корректировка [14].

Кроме этого, сопоставление расчетных значений $\Pi(n/\alpha)$ с точными аналитическими подсчетами Л. Милн-Томсона для полных эллиптических интегралов 3-го рода [11, с. 420, примеры 16 и 18] $\Pi(0,0625/30) = 1,74306$ и $\Pi(0,0625/30) = 2,80099$ дало практически полное совпадение результатов, соответственно $1,74375(+0,04\%)$ и $2,80050(-0,02\%)$.

Сравнение расчетных значений полного эллиптического интеграла 3-го рода $\Pi(n/\alpha)$ с точными данными (в скобках)
Comparison of the calculated values of the total elliptic integral 3rd genera $\Pi(n/\alpha)$ with exact data (in parentheses)

Значения полного эллиптического интеграла 3-го рода $\Pi(n/\alpha)$ Values of the total elliptic integral of genus 3rd $\Pi(n/\alpha)$						
Параметр n Parameter n	Модулярный угол α , град. Modular angle α , degrees					
	10	30	45	60	75	88
Значения параметра $0 \leq n \leq 1$ — расчет по формулам (3)–(12) Parameter values $0 \leq n \leq 1$ — calculation by formulas (3)–(12)						
0,1	1,668 ~ 0 % (1,669)	1,781 ~ 0 % (1,780)	1,967 + 0,2 % (1,963)	2,474 + 0,6 % (2,460)	2,985 + 0,5 % (2,966)	5,124 – 1,4 % (5,155)
0,25	1,828 – 0,1 % (1,829)	1,956 – 0,1 (1,957)	2,175 + 0,4 (2,168)	2,767 + 0,7 (2,747)	3,368 + 0,5 (3,343)	5,909 – 2,7 (5,958)
0,5	2,238 – 0,1 % (2,241)	2,413 ~ 0,0 (2,414)	2,712 + 0,4 (2,701)	3,580 + 2,0 (3,511)	4,459 + 1,6 (4,366)	8,222 – 3,9 (8,243)
0,75	3,165 – 0,3 % (3,174)	3,450 – 0,1 (3,454)	3,947 + 0,4 (3,931)	5,482 + 2,8 (5,330)	7,054 + 2,4 (6,886)	13,958 – 3,3 (14,429)
0,9	5,026 ~ 0 % (5,025)	5,570 + 0,6 (5,536)	6,500 + 1,1 (6,426)	9,156 – 0,3 (9,180)	12,240 – 1,9 (12,464)	29,656 – 2,1 (30,304)
0,95	7,141 + 0,4 % (7,113)	8,013 + 1,5 (7,895)	9,463 + 2,0 (9,279)	13,596 – 0,9 (13,721)	18,630 – 3,4 (19,293)	29,656 – 2,1 (30,304)
$\sin^2(\alpha)$	$n = 0,030$ 1,609 + 0,1 % (1,607)	$n = 0,25$ 1,970 + 0,7 (1,957)	$n = 0,5$ 2,726 + 0,9 (2,701)	$n = 0,821$ 6,502 – 0,1 (6,508)	$n = 0,933$ 15,924 – 0,9 (16,067)	$n = 0,9988$ 822,099 – 1,1 (831,333)
Значения параметра $1 \leq n \leq 20$ — расчет по формулам (13)–(15) Parameter values $1 \leq n \leq 20$ — calculation by formulas (13)–(15)						
1,5	–0,016 ~ 0 % (–0,016)	–0,167 ~ 0,0 (–0,167)	–0,460 + 0,8 (–0,457)	–1,446 + 1,8 (–1,420)	–2,582 + 4,1 (–2,481)	–6,398 – 4,0 (–6,665)
2	–0,012 ~ 0 % (–0,012)	–0,121 ~ 0,0 (–0,121)	–0,314 + 0,3 (–0,313)	–0,879 + 1,1 (–0,870)	–1,477 + 4,3 (–1,416)	–3,455 – 1,0 (–3,492)
5	–0,0048 ~ 0 % (–0,0048)	–0,045 ~ 0,0 (–0,045)	–0,109 ~ 0,0 (–0,109)	–0,261 – 1,2 (–0,264)	–0,412 + 2,6 (–0,402)	–0,911 – 0,6 (–0,916)
10	–0,002 ~ 0 % (–0,002)	–0,022 ~ 0,0 (–0,022)	–0,052 ~ 0,0 (–0,052)	–0,121 – 1,4 (–0,123)	–0,189 + 3,1 (–0,183)	–0,415 + 1,9 (–0,412)
20	–0,001 ~ 0 % (–0,001)	–0,011 ~ 0,0 (–0,011)	–0,026 ~ 0,0 (–0,026)	–0,059 ~ 0,0 (–0,059)	–0,092 + 4,9 (–0,088)	–0,204 + 4,0 (–0,196)
Значения параметра $20 \leq n \leq 100$ — расчет по формулам (13), (14), (16) Parameter values $20 \leq n \leq 100$ — calculation by formulas (13), (14), (16)						
25	–0,001 ~ 0 % (–0,001)	–0,009 ~ 0,0 (–0,009)	–0,021 + 1,4 (–0,020)	–0,047 ~ 0,0 (–0,047)	–0,073 + 4,9 (–0,070)	–0,158 + 1,6 (–0,155)
30	–0,0008 ~ 0 % (–0,0008)	–0,007 ~ 0,0 (–0,007)	–0,017 ~ 0,0 (–0,017)	–0,039 + 0,3 (–0,037)	–0,061 + 4,8 (–0,058)	–0,131 + 1,5 (–0,129)
50	–0,0005 ~ 0 % (–0,0005)	–0,004 ~ 0,0 (–0,004)	–0,010 ~ 0,0 (–0,010)	–0,023 ~ 0,0 (–0,023)	–0,036 – 4,8 (–0,034)	–0,077 + 1,5 (–0,076)
100	–0,0002 ~ 0 % (–0,0002)	–0,002 ~ 0,0 (–0,002)	–0,005 ~ 0,0 (–0,005)	–0,011 ~ 0,0 (–0,011)	–0,018 + 5,0 (–0,017)	–0,038 ~ 0,0 (–0,038)
Значения параметра $-100 \leq n \leq 0$ — расчет по формулам (17)–(19) Parameter values $-100 \leq n \leq 0$ — calculation by formulas (17)–(19)						
–0,1	1,509 ~ 0 % (1,509)	–1,606 + 0,2 (–1,604)	–1,768 + 0,6 (–1,761)	–2,200 + 1,5 (–2,180)	2,652 + 2,0 (2,601)	4,585 + 4,2 (4,400)
–0,25	1,415 ~ 0 % (1,415)	–1,506 + 0,3 (–1,502)	–1,657 + 0,9 (–1,642)	–2,057 + 1,9 (–2,018)	2,446 + 2,2 (2,392)	4,193 + 5,4 (3,979)

Значения полного эллиптического интеграла 3-го рода $\Pi(n/\alpha)$ Values of the total elliptic integral of genus 3rd $\Pi(n/\alpha)$						
Параметр n Parameter n	Модулярный угол α , град. Modular angle α , degrees					
	10	30	45	60	75	88
-0,5	1,292 ~ 0 % (1,291)	-1,374 + 0,5 (-1,366)	-1,507 + 1,3 (-1,488)	-1,850 + 2,3 (-1,808)	2,171 + 2,2 (2,125)	3,653 + 5,8 (3,451)
-1	1,119 + 0,1 % (1,118)	-1,187 + 0,8 (-1,177)	-1,296 + 1,8 (-1,273)	-1,561 + 2,5 (-1,522)	1,795 + 1,8 (1,764)	2,919 + 5,6 (2,763)
-5	0,645 + 0,2 % (0,644)	-0,677 + 1,4 (-0,668)	-0,722 + 2,4 (-0,705)	-0,808 + 1,4 (-0,797)	0,870 - 1,4 (0,882)	1,245 + 2,2 (1,219)
-10	0,476 + 0,2 % (0,475)	-0,496 + 1,4 (-0,489)	-0,521 + 2,1 (-0,511)	-0,565 + 0,5 (-0,563)	0,593 - 2,7 (0,610)	0,798 + 0,5 (0,794)
-50	0,221 + 0,2 % (0,220)	-0,226 + 0,2 (-0,224)	-0,232 + 1,5 (-0,229)	-0,241 ~ 0,0 (-0,241)	0,247 - 1,6 (0,251)	0,291 ~ 0,0 (0,291)
-80	0,175 ~ 0 % (0,175)	-0,179 + 1,1 (-0,177)	-0,183 + 1,4 (-0,180)	-0,188 ~ 0,0 (-0,188)	0,194 ~ 0,0 (0,194)	0,218 - 0,8 (0,220)
-100	0,157 + 0,1 % (0,156)	-0,160 + 1,0 (-0,158)	-0,163 + 1,2 (-0,161)	-0,166 - 1,3 (-0,167)	0,172 ~ 0,0 (0,172)	0,187 - 2,7 (0,192)

Примечание: Жирная линия в интервале значений $0 \leq n \leq 1$ разделяет области параметров со значениями $0 \leq n \leq \sin^2 \alpha$ и $\sin^2 \alpha \leq n \leq 1$.

Note: The bold line in the value range $0 \leq n \leq 1$ separates the parameter areas with the values $0 \leq n \leq \sin^2 \alpha$ and $\sin^2 \alpha \leq n \leq 1$.

Вышеизложенный анализ позволяет рекомендовать полученные расчетные зависимости в элементарных функциях (3)–(19) для определения значений полного эллиптического интеграла 3-го рода $\Pi(n/\alpha)$ как в прикладных, так и теоретических исследованиях в различных областях науки и техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении теоретических и прикладных исследований по моделированию гидрогеофизических фильтрационных процессов и других потенциальных потоков нередко возникает необходимость аналитического определения значений «неберущихся» эллиптических интегралов, что связано с трудоемкими математическими подсчетами, перекрестным нелинейным интерполированием данных специальных таблиц и графиков и др. Использование при решении прикладных задач для их определения компьютерных программ дает только дискретные результаты в «цифрах» (а не в «символах») без возможности их последующих преобразований для по-

лучения общего аналитического решения в элементарных функциях. Поэтому, несмотря на наличие различных вычислительных программ, позволяющих с высокой точностью рассчитать значения «неберущихся» интегралов, аналитические решения востребованы до настоящего времени, поскольку имеют большие возможности по выявлению для всей области задачи внутренних физических причинно-следственных связей в виде простых формул, их использованию в математических преобразованиях и оценке влияния на итоговые результаты.

В работе предложены аналитические зависимости в элементарных функциях, позволяющие определять значения полного эллиптического интеграла 3-го рода с достаточной точностью ($\sim < 2-4\%$) при проведении прикладных (и теоретических) исследований. Приводится сравнение полученных результатов с точными данными программы Mathcad для широкого интервала изменений параметра интеграла $-100 \leq n \leq 100$ и теоретических решений Л. Милн-Томсона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Павловский Н.Н. Собрание сочинений. Т. 2. Движение грунтовых вод. М.-Л. : Изд-во АН СССР, 1956. 771 с.
2. Chawla A.S. Stability of structure with two cut-offs founded on pervious strata of finite depth // Irrigation and Power. 1985. Vol. 42. Issue 2. Pp. 155–160.
3. Сенков А.М., Фильчаков П.Ф. Приближенные методы расчета стационарного движения грунтовых вод под гидротехническими сооружениями. Киев : Изд-во Акад. наук Украинской ССР, 1952. 228 с.
4. Козлов В.С. Гидромеханический расчет флюэтбетов. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1941. 278 с.

5. Дидковская Т.В. Об одном случае фильтрации под заглубленным флютбетом // Украинский математический журнал. 1974. Т. 26. № 1. С. 74–77.
6. Дегтярь В.Г. Решение одной задачи фильтрации в котлован, огражденный шпунтами // Гидравлика и гидротехника. 1981. № 33. С. 93–97.
7. Эмих В.Н. Фильтрация из подпочвенных источников // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 1999. № 2. С. 72–85.
8. Дьогтяр В.Г. Гидромеханічний розруханок обхшдної фільтрації на ділянці спряження водозливної греблі з русловою земляною греблею // Доповіді АН УкСССР. Серія А: физ.-тех. и мат. науки. 1968. № 10. С. 889–891.
9. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. М. : Наука, 1977. 342 с.
10. Лаврик В.И., Савенков В.Н. Справочник по конформным отображениям. Киев : Наукова думка, 1970. 252 с.
11. Милн-Томсон Л. Эллиптические интегралы // Справочник по специальным функциям / под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. М. : Наука, 1979. С. 401–441.
12. Нельсон-Скорняков Ф.Б. Фильтрация в однородной среде. М. : Советская наука, 1949. 568 с.
13. Антонюк В.М., Ульшин В.А. Расчет взаимной индуктивности двух круговых контуров с помощью приближенных формул для эллиптических интегралов // Известия вузов. Электромеханика. 1977. № 10. С. 1073–1076.
14. Пархомовский Я.М. Приближенные формулы для эллиптических интегралов 3-го рода // Ученые записки ЦАГИ. 1979. Т. 10. № 3. С. 78–86.
15. Симонженков С.Д. О вычислении эллиптических интегралов третьего рода // Математические структуры и моделирование. 2000. № 5. С. 40–43.
16. Беляков В.М., Кравцова Р.И., Ратнопорт М.Г. Таблицы эллиптических интегралов. Т. 1. М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1962. 656 с.
17. Беляков В.М., Кравцова Р.И., Ратнопорт М.Г. Таблицы эллиптических интегралов. Т. 2. М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1963. 786 с.
18. Анахаев К.Н. О полных эллиптических интегралах 3-го рода в задачах механики // Доклады Академии наук. 2017. Т. 473. № 2. С. 151–153. DOI: 10.7868/S0869565217080072
19. Анахаев К.Н. Эллиптические интегралы в нелинейных задачах механики // Доклады Российской академии наук. Физика. Технические науки. 2020. Т. 491. № 2. С. 24–29. DOI: 10.31857/S2686740020020042
20. Анахаев К.Н. О методах расчета потенциальных (фильтрационных) потоков на основе эллиптических интегралов Якоби // Гидротехническое строительство. 2008. № 8. С. 7–9.
21. Анахаев К.Н. О совершенствовании гидромеханических методов расчета потенциальных (фильтрационных) потоков // Инженерные системы. 2009 : тр. Междунар. науч.-практ. конф. 2009. С. 588–595.
22. Anakhaev K.N. On methods of calculating potential (seepage) flows on the basis of Jacobi elliptic integrals // Power Technology and Engineering. 2008. Vol. 42. Issue 5. Pp. 273–276. DOI: 10.1007/s10749-009-0052-0

Поступила в редакцию 22 июля 2022 г.

Принята в доработанном виде 4 октября 2022 г.

Одобрена для публикации 4 октября 2022 г.

ОБ АВТОРЕ: **Кошкинбай Назирович Анахаев** — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела математического моделирования геофизических процессов; **Институт прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук (ИПМА КБНЦ РАН)**; 360000, г. Нальчик, ул. Шортанова, д. 89а; РИНЦ ID: 144946, Scopus: 6602403743, ResearcherID: B-4652-2016, ORCID: 0000-0003-4357-4349, JRJD: 38853246; anaha13@mail.ru.

REFERENCES

1. Pavlovsky N.N. *Collected works. Vol. 2. Ground-water movement*. Moscow-Leningrad, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1956; 771. (rus.).
2. Chawla A.S. Stability of structure with two cut-offs founded on pervious strata of finite depth. *Irrigation and Power*. 1985; 42(2):155-160.
3. Senkov A.M., Filchakov P.F. *Approximate methods for calculating the stationary movement of groundwater under hydraulic structures*. Kyiv, Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1952; 228. (rus.).
4. Kozlov V.S. *Hydromechanical calculation of flutes*. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat, 1941; 278. (rus.).
5. Didkovskaya T.V. On one case of filtration under a deep flutbet. *Ukrainian Mathematical Journal*. 1974; 26(1):74-77. (rus.).
6. Degtyar V.G. Solution of one problem of filtration into a pit fenced with piles. *Hydraulics and hydraulic equipment*. 1981; 33:93-97. (rus.).
7. Emich V.N. Filtration from subsurface sources. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Fluid and gas mechanics*. 1999; 2:72-85. (rus.).

8. Degtyar V.G. Hydromechanical calculation of bypass filtration at the interface of a weir dam with a channel earthen dam. *Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Series A: physical-technical and mat. sciences*. 1968; 10:889-891.
9. Janke E., Emde F., Loesch F. *Special functions*. Moscow, Nauka, 1977; 342. (rus.).
10. Lavrik V.I., Savenkov V.N. *Guide to conformal displays*. Kyiv, Naukova Dumka, 1970; 252. (rus.).
11. Milne-Thomson L. Elliptic integrals. *Reference to special functions* / Edited by M. Abramowitz and I. Stygan. Moscow, Science, 1979; 401-441. (rus.).
12. Nelson-Skornyakov F.B. *Filtration in a homogeneous medium*. Moscow, Soviet Science, 1949; 568. (rus.).
13. Antonyuk V.M., Ulshin V.A. Calculation of the mutual inductance of two circular circuits using approximate formulas for elliptic integrals. *Izvestiya vuzov. Electromechanics*. 1977; 10:1073-1076. (rus.).
14. Parkhomovsky Ya.M. Approximate formulas for elliptic integrals of the 3rd kind. *TsAGI Scientific Notes*. 1979; 10(3):78-86. (rus.).
15. Simonzhenkov S.D. On the calculation of elliptic integrals of the third kind. *Mathematical Structures and Modeling*. 2000; 5:40-43. (rus.).
16. Belyakov V.M., Kravtsova R.I., Rappoport M.G. *Tables of elliptic integrals. Vol. 1*. Moscow, Publishing house Acad. sciences of the USSR, 1962; 656. (rus.).
17. Belyakov V.M., Kravtsova R.I., Rappoport M.G. *Tables of elliptic integrals. Vol. 2*. Moscow, Publishing house Acad. sciences of the USSR, 1963; 786. (rus.).
18. Anakhaev K.N. On complete elliptic integrals of the 3rd kind in problems of mechanics. *Reports of the Academy of Sciences*. 2017; 473(2):151-153. DOI: 10.7868/S0869565217080072 (rus.).
19. Anakhaev K.N. Elliptic integrals in nonlinear problems of mechanics. *Reports of the Russian Academy of Sciences. Physics. Technical sciences*. 2020; 491(2):24-29. DOI: 10.31857/S2686740020020042
20. Anakhaev K.N. On methods of calculation of potential (filtration) flows based on jacobi elliptic integrals. *Hydrotechnical Construction*. 2008; 8:7-9. (rus.).
21. Anakhaev K.N. On Improvement of hydromechanical methods for calculation of potential (filtration) flows. *Engineering Systems. 2009: works international. scientific-pract. conf.* 2009; 588-595. (rus.).
22. Anakhaev K.N. On methods of calculating potential (seepage) flows on the basis of Jacobi elliptic integrals. *Power Technology and Engineering*. 2008; 42(5):273-276. DOI: 10.1007/s10749-009-0052-0

Received July 22, 2022.

Adopted in revised form on October 4, 2022.

Approved for publication on October 4, 2022.

B I O N O T E S : **Koshkinbai N. Anakhaev** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Rresearcher of the Department of Mathematical Modeling of Geophysical Processes; **Institute of Applied Mathematics and Automation of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences**; 89a Shortanov st., Nalchik, 360000, Russian Federation; ID RISC: 144946, Scopus: 6602403743, ResearcherID: B-4652-2016, ORCID: 0000-0003-4357-4349, JRJD: 38853246; anaha13@mail.ru.

Совершенствование расчетных зависимостей для температуры воздуха в помещении при интегральном регулировании климатических систем

Олег Дмитриевич Самарин

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Дальнейшее развитие методов расчета теплового режима помещений при автоматизации систем обеспечения микроклимата является актуальным. Цель исследования — поиск приближенной аналитической зависимости температуры воздуха в условиях скачка теплового потока в кондиционируемых помещениях от времени для интегрального закона регулирования компенсационного теплового воздействия со стороны климатического оборудования. В качестве научной гипотезы выдвигается положение о возможности выражения данной зависимости через тригонометрические функции со скользящими параметрами.

Материалы и методы. Предполагается использование основного дифференциального уравнения теплового баланса помещения, обслуживаемого климатическими системами, оборудованными непрерывными интегральными регуляторами, при скачкообразном изменении теплового возмущения. Применяется линеаризация уравнения за счет замораживания переменных коэффициентов и операционный метод Хевисайда, а также метод нормировки для устранения влияния особенности решения на возможность учета начальных условий.

Результаты. Найдены аналитические выражения для коэффициентов и параметров приближенной зависимости изменения температуры в помещении при интегральном регулировании систем кондиционирования воздуха в условиях скачка теплопоступлений. Получены упрощенные формулы для максимального отклонения температуры воздуха и скользящей частоты для участвующих в решении тригонометрических функций, а также дана оценка их погрешности по сравнению с точным решением на примере одного из помещений в жилом здании для климатических условий Москвы.

Выводы. Показано, что зависимость температуры воздуха в помещении, обслуживаемом климатическими системами, регулируемые по интегральному закону, от времени можно представить в упрощенном аналитическом виде на основе тригонометрических функций с переменной частотой. Дополнительно подтверждена справедливость ранее полученного точного решения для изменения температуры в виде бесконечного ряда по степеням момента времени с начала теплового возмущения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микроклимат, температура, тепловой баланс, теплопоступления, регулирование, интегральный закон, коэффициент передачи

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Самарин О.Д. Совершенствование расчетных зависимостей для температуры воздуха в помещении при интегральном регулировании климатических систем // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 10. С. 1389–1395. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1389-1395

Автор, ответственный за переписку: Олег Дмитриевич Самарин, samarinod@mgsu.ru, samarin-oleg@mail.ru.

Improvement of the calculated dependences for indoor air temperature in the integrated control of climate systems

Oleg D. Samarin

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

ABSTRACT

Introduction. The paper indicates that the further development of methods for calculating the thermal regime of disturbances in the automation of microclimate systems is still relevant. The aim of the work is to find an approximate analytical dependence of the air temperature in the conditions of a jump in the heat flow in air-conditioned rooms on time for the integral law of regulation of compensatory heat exposure from the climatic equipment. As a scientific hypothesis, the position is put forward about the possibility of expressing this dependence through trigonometric functions with sliding parameters.

Materials and methods. The work involves the use of the basic differential equation of the thermal balance of a room serviced by climate systems equipped with continuous integral regulators, with a sudden change in the thermal disturbance. The linearization of the equation due to the freezing of variable coefficients and the Heaviside operational method are used,

as well as the normalization method to eliminate the influence of the solution feature on the possibility of taking into account the initial conditions.

Results. Analytical expressions are found for the coefficients and parameters of the approximate dependence of the temperature change in the room during the integral regulation of air conditioning systems under conditions of a jump in heat supply. Simplified formulas for the maximum deviation of the air temperature and the sliding frequency for the trigonometric functions involved in the solution are obtained, and their error is estimated in comparison with the exact solution on the example of one of the rooms in a residential building for the climatic conditions of Moscow.

Conclusions. It is shown that the dependence of the air temperature in a room serviced by climate systems regulated by an integral law on time can be represented in a simplified analytical form on the basis of trigonometric functions with variable frequency. Additionally, the validity of the previously obtained exact solution for temperature changes in the form of an infinite series in degrees of time since the beginning of the thermal disturbance is confirmed.

KEYWORDS: microclimate, temperature, heat balance, heat gain, regulation, integral law, transmission coefficient

FOR CITATION: Samarina O.D. Improvement of the calculated dependences for indoor air temperature in the integrated control of climate systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(10):1389-1395. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1389-1395 (rus.).

Corresponding author: Oleg D. Samarina, samarinod@mgsu.ru, samarin-oleg@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Требуемая комфортность тепловлажностной обстановки в обслуживаемой зоне помещения вместе с обеспечением безопасности жизнедеятельности находящихся в данном помещении людей должна поддерживаться благодаря работе систем обеспечения микроклимата независимо от режимов функционирования технологического оборудования, а также других внешних и внутренних переменных тепловых воздействий. При этом значительная часть нагрузки по стабилизации метеорологических параметров ложится на устройства автоматизации климатических систем. Вследствие появления новых конструкций теплообменных аппаратов с иными динамическими характеристиками и реализации более сложных алгоритмов управления задача исследования нестационарного теплового режима помещения в данных условиях продолжает быть актуальной.

В силу этих обстоятельств предметом исследования в настоящей статье будут методы расчета изменения температуры воздуха в кондиционируемых помещениях при появлении тепловых возмущений. Это необходимо, чтобы оценить качество работы автоматизированных климатических систем с точки зрения достижения показателей комфортности или требований к безопасности технологических процессов. Цель работы в этом случае сводится к поиску приближенной аналитической зависимости для температуры внутреннего воздуха от времени в условиях скачка теплового потока в помещении при интегральном законе регулирования компенсационного теплового воздействия от систем обеспечения микроклимата.

Одними из наиболее интересных публикаций по рассматриваемой тематике, которые появились в РФ и за рубежом в последнее время, являются работы [1–9]. В них приведен ряд решений, полученных как с применением численных методов, так и аналитических, но во многом им свойственна либо некоторая громоздкость и сложность для применения в инженерной практике, хотя они и обладают ком-

плексным характером [1, 3–5, 8, 9], либо, наоборот, в них осуществляется учет только части факторов, оказывающих влияние на исследуемые процессы в воздухе помещения, его ограждениях и оборудовании систем обеспечения микроклимата [2, 6, 7].

Кроме того, можно обратить внимание еще на некоторые исследования в рассматриваемой области, авторами которых, напротив, решается обратная задача, а именно определение теплофизических параметров материала при изучении распространения в нем температурных колебаний [10–12] или с помощью термографии [13]. В то же время в статьях [14, 15] изучаются вопросы моделирования процессов в помещении в целом. В частности, в исследовании [14] представлена достаточно подробная многопараметрическая численная модель имитационного типа, но она относится только к холодному периоду года при наличии отопления. Публикация [15] базируется главным образом на методах теории автоматического регулирования, но ее результаты все же сложны для инженерной практики. Наконец, имеются работы, в которых рассматриваются общие принципы управления климатическими системами здания и реализации снижения энергопотребления [16, 17], но их общий характер также приводит к отсутствию интересующих нас конкретных зависимостей. Следовательно, дальнейшие исследования по данному вопросу для получения соотношений, которые будут достаточно точными и учитывающими основные существенные для задачи факторы, но при этом имеющими инженерный вид, представляются до сих пор актуальными.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работах [18, 19] автором было продемонстрировано, что основное дифференциальное уравнение баланса конвективной теплоты в помещении, которое обслуживается воздушной системой кондиционирования воздуха, оборудованной интегральным регулятором, с помощью подстановки $z = \sqrt{t}$, где t — промежуток времени, s , с момента появления теплового

возмущения, допускает преобразование к следующему относительно простому виду:

$$\frac{d^2\theta_b}{dz^2} + Cz\theta_b = 0, \quad (1)$$

где $\theta_b = (t_b - t_{b,0})$, K — отклонение текущего значения температуры воздуха в помещении t_b от ее контролируемой величины (уставки) $t_{b,0}$, так как нас интересует главным образом оно, а не абсолютный уровень t_b ; $C = 4A/B$, $c^{-3/2}$ — комплексный параметр, характеризующий собственную теплоустойчивость помещения и свойства автоматизированной климатической системы, причем A в данном случае можно определить по формуле [18, 19]:

$$A = G_{\Pi} c_b K_{\text{рег}} / 3,6, \quad (2)$$

где G_{Π} — массовый расход притока, кг/ч; $c_b = 1,005$ кДж/(кг·К) — удельная теплоемкость воздуха; $K_{\text{рег}}$ — эквивалентный коэффициент передачи автоматизированной системы, c^{-1} , по каналу « $t_b \rightarrow$ производная от температуры притока t_{Π} ».

Коэффициент B вычисляется по выражению [18–20]:

$$B = \Sigma \left[A_m \sqrt{\lambda c \rho} \right]_i, \quad (3)$$

где λ , c и ρ — соответственно теплопроводность, Вт/(м·К), удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), и плотность материала слоя i -го массивного ограждения, обращенного внутрь помещения, в том числе наружных и внутренних стен, перегородок и междуэтажных перекрытий; A_m — площадь каждого из перечисленных ограждений, m^2 .

Очевидно уравнение (1) оказывается существенно нелинейным, причем с особенностью при $z = 0$. В упомянутых работах [18, 19] было получено аналитическое решение с помощью разложения искомой функции в ряд по степеням z методом неопределенных коэффициентов. Однако можно провести приближенную линеаризацию (выражение (1)), заменяя во втором слагаемом переменную z на ее среднее значение z_{cp} для рассматриваемого интервала времени. Тогда коэффициент при θ_b становится постоянным, и можно применить простейший операционный метод решения. В этом случае характеристическое уравнение будет иметь вид:

$$p^2 + Cz_{\text{cp}} = 0, \quad (4)$$

где p — оператор Хевисайда. Фактически в этом случае помещение трактуется как линейное инерционное звено второго порядка. Отсюда $p = \pm i\sqrt{Cz_{\text{cp}}}$ и, следовательно:

$$\theta_b = C_1 \cos\left(z\sqrt{Cz_{\text{cp}}}\right) + C_2 \sin\left(z\sqrt{Cz_{\text{cp}}}\right). \quad (5)$$

Константы C_1 и C_2 могут быть получены из начальных условий. В частности, поскольку при $z = 0$

значение θ_b также равно нулю, имеем $C_1 = 0$. Чтобы найти C_2 , положим для начала, что $z_{\text{cp}} = z/a$, где $a > 1$ — некоторый параметр, показывающий, во сколько раз средняя величина z за исследуемый период меньше конечной. В этом случае получаем:

$$\theta_b = C_2 \sin\left(\sqrt{Cz^3/a}\right) = C_2 \sin\left(\sqrt{y/a}\right), \quad (6)$$

где $y = Cz^3 = C\tau^{3/2}$ — теперь уже безразмерный аргумент.

Отметим, что в таком виде у решения сохраняется особенность при $z = 0$, поэтому непосредственно использовать второе начальное условие $d\theta_b/dz = 2Q_{\text{пост}}/B$ для исходного момента времени нельзя. Поэтому необходимо прибегнуть к приему нормировки по наибольшему значению, что представляется особенно предпочтительным, в том числе, и потому, что с точки зрения практических расчетов нас интересует, чтобы получаемая формула давала в первую очередь достоверные значения максимального отклонения температуры от уставки и момента времени, при котором оно наблюдается. Поскольку, очевидно, максимум функции $\sin(\sqrt{y/a})$ равен 1 при $\sqrt{y/a} = \pi/2$, при сравнении с точным решением в виде ряда [18, 19] оказывается, что величину C_2 нужно считать равной максимальному уровню θ_b :

$$C_2 = \theta_{\text{max}} = \frac{1,4Q_{\text{пост}}}{\sqrt[3]{AB^2}}. \quad (7)$$

Одновременно получаем, что $1/a = \pi^2/4y_0$, где $y_0 \approx 3,48$ — значение y , для которого имеет место $\theta = \theta_{\text{max}}$, откуда $a = \sqrt{2}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для наглядности на рис. 1 сплошной линией показаны результаты расчета зависимости для θ_b от y по уравнению (6) при $C_2 = 1$ и для сравнения пунктиром — точное решение [9]. Видно, что при $y < 6$ получается хорошее качественное и количественное совпадение. Возможен и другой подход к учету второго начального условия, а именно непосредственно из формулы (5) при $C_1 = 0$ оказывается, что $d\theta_b/dz = C_2\sqrt{Cz_{\text{cp}}} = 2Q_{\text{пост}}/B$, откуда имеем:

$$C_2 = \frac{2Q_{\text{пост}}}{B\sqrt{Cz_{\text{cp}}}} = \frac{Q_{\text{пост}}}{\sqrt{ABz_{\text{cp}}}}. \quad (8)$$

Если теперь опять записать $z_{\text{cp}} = z/a$, окончательно находим:

$$\theta_b = \frac{Q_{\text{пост}}\sqrt{a}}{\sqrt{ABz}} \sin\left(\sqrt{\frac{Cz^3}{a}}\right). \quad (9)$$

На рис. 2 сплошная линия отражает результаты вычислений по формуле (9) при условии $a = 2$, для которого в данном случае можно добиться наилуч-

шего совпадения с данными точного решения [18, 19], отмеченного пунктиром, во всем диапазоне изменения времени с момента теплового воздействия. При этом использовались значения параметров $Q_{\text{пост}} = 500 \text{ Вт}$, $B = 24\,000 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2}/\text{К}$ и $A = 0,25 \text{ Вт}/(\text{К} \cdot \text{с})$

для некоторого помещения в гражданском здании [18–20], откуда по определению $C = 4,17 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-3/2}$. Величина B была рассчитана в соответствии с конструктивными характеристиками здания и геометрическими размерами помещения.

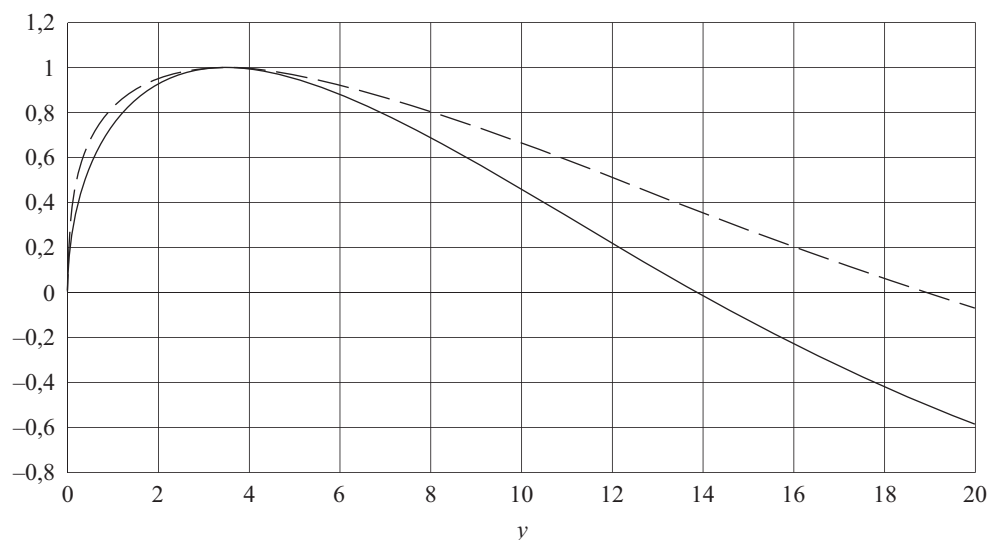


Рис. 1. Зависимость удельной величины θ_{in} от времени при автоматическом регулировании t_{in} (сплошная линия — по формуле (6) при $C_2 = 1$, пунктир — точное решение)

Fig. 1. The dependence of the specific value θ_{in} on time with automatic adjustment of t_{in} (solid line — according to the formula (6) at $C_2 = 1$, dotted line — the exact solution)

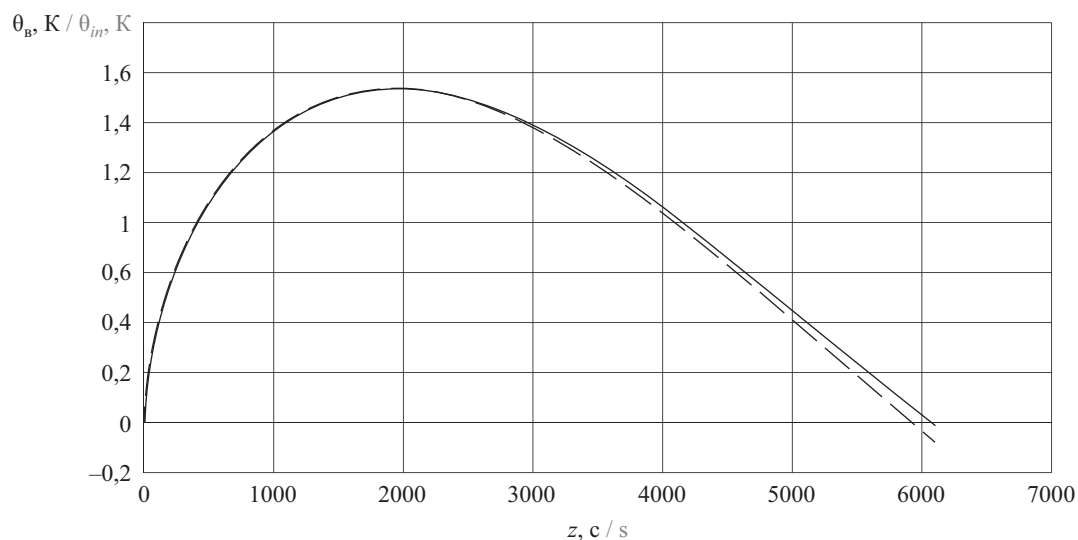


Рис. 2. Зависимость θ_{in} от времени для выбранного помещения при автоматическом регулировании t_{in} (сплошная линия — по формуле (9) при $a = 2$, пунктир — точное решение)

Fig. 2. The dependence θ_{in} on the time for the selected room with automatic adjustment of t_{in} (solid line — according to the formula (9) for $a = 2$, dotted line — the exact solution)

Таким образом, в отношении точности вариант (9) следует, очевидно, предпочесть формулам (6)–(7). Однако его недостатком является наличие переменной размерной величины z в числовом множителе

перед функцией $\sin$, что в определенной степени затрудняет приведение соотношения к безразмерному виду и сопоставление результатов в различных условиях и для разных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования в целом подтверждается первоначальная гипотеза о том, что зависимость величины t_b в помещении, которое обслуживается системами кондиционирования воздуха, регулируемые по интегральному закону, при скачкообразном изменении теплоступлений или теплопотерь действительно можно приближенно представить в форме тригонометрической функции со скользящей частотой. Кроме того, можно сделать следующие выводы:

- показано, что величина наибольшего отклонения t_b от уставки (динамическая ошибка регулирования $\theta_{\max}$) может быть использована в качестве постоянной нормировки при определении числового коэффициента в одном из вариантов полученной зависимости для изменения t_b с течением времени, начиная от момента появления теплового возмущения;
- обнаружено, что среднее за рассматриваемый период значение параметра $z = \sqrt{\tau}$ в зависимости от принятого варианта приближенной зависимости для θ_b следует принимать меньше конечного в $\sqrt{2}$ или в 2 раза;
- отмечено, что разработанные ранее автором теоретические соотношения для величины избыточ-

ной температуры θ_b в исследуемых режимах находят дополнительное подтверждение при использовании других вариантов математической модели, и поэтому их можно применять для практических инженерных расчетов в процессе проектирования автоматизированных климатических систем;

- продемонстрировано, что сравнение результатов по различным вариантам зависимостей для θ_b дает возможность идентификации упрощенных моделей и определения их параметрических характеристик, которые необходимы для вычисления θ_b с их помощью. Такая процедура будет достаточно простой и доступной для инженерной практики.

Дальнейшее развитие предлагаемого исследования можно провести в направлении распространения достигнутых результатов на другие случаи конструктивных решений систем обеспечения микроклимата, например, с использованием сплит-систем и фоновой приточной вентиляции, а также в сторону уточнения условий применимости обнаруженных зависимостей в отношении допустимого диапазона теплотехнических характеристик помещения и значений времени, прошедшего с момента скачка теплопоступлений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рафальская Т.А., Березка А.К., Савенков А.А. Теоретическое исследование теплозащиты ограждающих конструкций зданий при аварийном теплоснабжении // Актуальные вопросы архитектуры и строительства : мат. X Всерос. науч.-техн. конф. 2017. С. 213–218.
2. Малявина Е.Г. Расчет темпа остывания помещения после отключения теплоснабжения // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 2. С. 55–58.
3. Дорошенко А.В. Имитационная термодинамическая модель здания // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2017. № 12 (1000). С. 42–43.
4. De Rosa M., Bianco V., Scarpa F., Tagliafico L.A. Modelling of energy consumption in buildings: an assessment of static and dynamic models // Russian Journal of Construction Science and Technology. 2016. Vol. 2. Issue 1. Pp. 12–24. DOI: 10.15826/rjcs.2016.1.002
5. Latif M., Nasir A. Decentralized stochastic control for building energy and comfort management // Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 24. P. 100739. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.100739
6. Tarasova D.S., Petrichenko M.R. Buildings quasi-stationary thermal behavior // Magazine of Civil Engineering. 2017. № 4 (72). Pp. 28–35. DOI: 10.18720/MCE.72.4
7. Petrichenko M.R., Nemova D.V., Kotov E.V., Tarasova D.S., Sergeev V.V. Ventilated façade integrated with the HVAC system for cold climate // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 1 (77). Pp. 47–58. DOI: 10.18720/MCE.85.5
8. Faouzi D., Bibi-Triki N., Draoui B., Abène A. Modeling a fuzzy logic controller to simulate and optimize the greenhouse microclimate management using MATLAB SIMULINK // International Journal of Mathematical Sciences and Computing. 2017. Vol. 3. Issue 3. Pp. 12–27. DOI: 10.5815/ijmsc.2017.03.02
9. Ryzhov A., Ouerdane H., Gryazina E., Bischi A., Turitsyn K. Model predictive control of indoor microclimate: existing building stock comfort improvement // Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 179. Pp. 219–228. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.10.046
10. Sáez Blázquez C., Farfán Martín A., Martín Nieto I., González-Aguilera D. Measuring of thermal conductivities of soils and rocks to be used in the calculation of a geothermal installation // Energies. 2017. Vol. 10. Issue 6. P. 795. DOI: 10.3390/en10060795
11. Ozturk A. Overall heat transfer coefficient of functionally graded hollow cylinder // Solid State Phenomena. 2017. Vol. 267. Pp. 177–181. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.267.177
12. Li N., Chen Q. Experimental study on heat transfer characteristics of interior walls under partial-space heating mode in hot summer and cold winter zone in China // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 162. P. 114264. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114264
13. Marino B.M., Muñoz N., Thomas L.P. Estimation of the surface thermal resistances and heat loss by

conduction using thermography // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 114. Pp. 1213–1221. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.033

14. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Building inside air temperature parametric study // *Magazine of Civil Engineering*. 2017. Vol. 68. Issue 08. Pp. 65–75. DOI: 10.5862/MCE.68.7

15. Serale G., Capozzoli A., Fiorentini M., Bernardini D., Bemporad A. Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: problem formulation, applications and opportunities // *Energies*. 2018. Vol. 11. Issue 3. P. 631. DOI: 10.3390/en11030631

16. Belussi L., Barozzi B., Bellazzi A., Danza L., Devitofrancesco A., Ghellere M. et al. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions // *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 25. P. 100772. DOI: 10.1016/j.job.2019.100772

17. Sha H., Xu P., Yang Z., Chen Y., Tang J. Overview of computational intelligence for building energy system design // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 108. Pp. 76–90. DOI: 10.1016/j.rser.2019.03.018

18. Самарин О.Д. Расчет теплового режима помещения при использовании интегральных регуляторов для климатических систем // *Известия вузов. Строительство*. 2020. № 2 (734). С. 28–35. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-734-2-28-35

19. Самарин О.Д., Ключко А.К. Численные и приближенные методы в задачах строительной теплофизики и климатологии. М.: МГСУ, 2021. 96 с.

20. Самарин О.Д. Расчет остывания помещений здания в аварийных режимах для обеспечения надежности их теплоснабжения // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 4. С. 496–501. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.496-501

Поступила в редакцию 29 июня 2022 г.

Принята в доработанном виде 4 октября 2022 г.

Одобрена для публикации 4 октября 2022 г.

ОБ АВТОРЕ: Олег Дмитриевич Самарин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1708-9583, ORCID: 0000-0003-2533-9732; samarinod@mgsu.ru, samarin-oleg@mail.ru.

REFERENCES

1. Rafalskaya T.A., Beryozka A.K., Savenkov A.A. Theoretical study of thermal protection of building envelopes in case of emergency heat supply. *Topical Issues of Architecture and Construction : papers of 10th All-Russian science and technical conference*. 2017; 213-218. (rus.).

2. Malyavina E.G. Calculation of the rate of cooling of a room after turning off the heat supply. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 2:55-58. (rus.).

3. Doroshenko A.V. Simulation thermodynamic model of a building. *BST: Byulleten' Stroitel'noj Tehniki*. 2017; 12:42-43. (rus.).

4. De Rosa M., Bianco V., Scarpa F., Tagliafico L.A. Modelling of energy consumption in buildings: an assessment of static and dynamic models. *Russian Journal of Construction Science and Technology*. 2016; 2(1):12-24. DOI: 10.15826/rjcs.2016.1.002

5. Latif M., Nasir A. Decentralized stochastic control for building energy and comfort management. *Journal of Building Engineering*. 2019; 24:100739. DOI: 10.1016/j.job.2019.100739

6. Tarasova D.S., Petritchenko M.R. Building quasi-stationary thermal behavior. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 4(72):28-35. DOI: 10.18720/MCE.72.4

7. Petrichenko M.R., Nemova D.V., Kotov E.V., Tarasova D.S., Sergeev V.V. Ventilated facade integrated

with the HVAC system for cold climate. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 1(77):47-58. DOI: 10.18720/MCE.85.5

8. Faouzi D., Bibi-Triki N., Draoui B., Abène A. Modeling a fuzzy logic controller to simulate and optimize the greenhouse microclimate management using MATLAB SIMULINK. *International Journal of Mathematical Sciences and Computing*. 2017; 3(3):12-27. DOI: 10.5815/ijmsc.2017.03.02

9. Ryzhov A., Ouerdane H., Gryazina E., Bischi A., Turitsyn K. Model predictive control of indoor microclimate: existing building stock comfort improvement. *Energy Conversion and Management*. 2019; 179: 219-228. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.10.046

10. Sáez Blázquez C., Farfán Martín A., Martín Nieto I., González-Aguilera D. Measuring of thermal conductivities of soils and rocks to be used in the calculation of a geothermal installation. *Energies*. 2017; 10(6):795. DOI: 10.3390/en10060795

11. Ozturk A. Overall heat transfer coefficient of functionally graded hollow cylinder. *Solid State Phenomena*. 2017; 267:177-181. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.267.177

12. Li N., Chen Q. Experimental study on heat transfer characteristics of interior walls under partial-space heating mode in hot summer and cold winter zone in

China. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 162:114264. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114264

13. Marino B.M., Muñoz N., Thomas L.P. Estimation of the surface thermal resistances and heat loss by conduction using thermography. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 114:1213-1221. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.033

14. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Building inside air temperature parametric study. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 68(08):65-75. DOI: 10.5862/MCE.68.7

15. Serale G., Capozzoli A., Fiorentini M., Bernardini D., Bemporad A. Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: problem formulation, applications and opportunities. *Energies*. 2018; 11(3):631. DOI: 10.3390/en11030631

16. Belussi L., Barozzi B., Bellazzi A., Danza L., Devitofrancesco A., Ghellere M. et al. A review of performance of zero energy buildings and energy effi-

ciency solutions. *Journal of Building Engineering*. 2019; 25:100772. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100772

17. Sha H., Xu P., Yang Z., Chen Y., Tang J. Overview of computational intelligence for building energy system design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; 108:76-90. DOI: 10.1016/j.rser.2019.03.018

18. Samarin O.D. Calculation of the indoor thermal mode with the use of integral controllers for climate control systems. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; 2(734):28-35. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-734-2-28-35 (rus.).

19. Samarin O.D., Klochko A.K. *Numerical and approximated methods in the problems of building thermal physics and climatology*. Moscow, MGSU, 2021; 96. (rus.).

20. Samarin O.D. The calculation of building cooling under emergency conditions to ensure their heating reliability. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:4:496-501. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.496-501 (rus.).

Received June 29, 2022.

Adopted in revised form on October 4, 2022.

Approved for publication on October 4, 2022.

B I O N O T E S : **Oleg D. Samarin** — Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 1708-9583, ORCID: 0000-0003-2533-9732; samarinod@mgsu.ru, samarin-oleg@mail.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.003.12

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1396-1407

Инжиниринг требований к формированию системы сметных документов в строительстве

Ирина Викторовна Каракозова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В современных условиях четко сформулированные требования к сметной документации, используемой для обоснования сметных затрат на строительство (капитальный ремонт, реконструкцию) объекта капитального строительства, способствуют однозначному формированию целей, функций, ограничений, требований его создания и последующей эксплуатации. В период реформирования системы ценообразования и сметного нормирования строительной отрасли остро встает вопрос о методическом сопровождении процесса обоснования величины сметных затрат в строительстве, а также полного и достоверного отражения затрат в сметной документации. Проведенный анализ основных форм первичной сметной документации на примере локальных сметных расчетов (смет), разрабатываемых с применением федеральных или территориальных сметных нормативов, подтвердил необходимость выполнения работ по разработке единых требований к составлению всех форм сметной документации. Кроме того, для внедрения и использования технологий информационного моделирования в строительстве также необходима разработка набора требований к сметным документам с целью систематизации и унификации информации, приводимой в них.

Материалы и методы. Применялись системный подход, общетеоретические методы познания (анализ, синтез, аналогия, обобщение, сопоставление и др.), методы управления проектами.

Результаты. Предложено использовать систему управления требованиями к сметной документации. Определены этапы разработки системы требований к сметной документации, процессы в составе каждого этапа, а также показатели результативности процесса, позволяющие оценить процесс в период его реализации. Сформулированы требования к составу и оформлению сметной документации.

Выводы. Внедрение предлагаемой системы управления требованиями к сметной документации в практическую деятельность будет способствовать повышению достоверности сметных затрат в строительстве, а также минимизации временных затрат на реализацию прохождения экспертизы сметной документации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ценообразование, сметная документация, локальная смета, сметные нормативы, инжиниринг, стоимостной инжиниринг, управление требованиями

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Каракозова И.В. Инжиниринг требований к формированию системы сметных документов в строительстве // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 10. С. 1396–1407. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1396-1407

Автор, ответственный за переписку: Ирина Викторовна Каракозова, i.kar@inbox.ru.

Engineering requirements for the formation of a system of estimate documents in construction

Irina V. Karakozova

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

ABSTRACT

Introduction. In modern conditions, clearly formulated requirements for the estimated documentation used to justify the estimated construction costs (major repairs, reconstruction) of a capital construction facility contribute to the unambiguous formation of goals, functions, restrictions, requirements for its creation and subsequent operation. During the reformation of the pricing system and the estimated rationing of the construction industry, the issue of methodological support for the process of substantiating the value of estimated costs in construction, as well as full and reliable reflection of costs in the estimated documentation, is acute. The analysis of the main forms of primary estimate documentation on the example of local estimates (estimates), developed using federal or territorial estimate standards, confirmed the need for work on the development of uniform requirements for the preparation of all forms of estimate documentation. In addition,

for the introduction and use of information modeling technologies in construction, it is also necessary to develop a set of requirements for estimate documents in order to systematize and unify the information provided in them.

Materials and methods. System approach, general theoretical methods of cognition (analysis, synthesis, analogy, generalization, comparison and others), project management methods.

Results. It is proposed to use a system for managing the requirements for the estimate documentation. The stages of the development of the system of requirements for the estimate documentation, the processes within each stage, as well as the performance indicators of the process, allowing to evaluate the process itself during its implementation, are determined. The requirements for the composition and design of the estimate documentation are formulated.

Conclusions. The implementation of the proposed management system for the requirements for the estimate documentation in practice, of course, will contribute to increasing the reliability of the estimated costs in construction, as well as minimizing the time spent on the implementation of the process of passing the examination of the estimate documentation.

KEYWORDS: pricing, estimated documentation, local estimates, estimated standards, engineering, cost engineering, requirements management

FOR CITATION: Karakozova I.V. Engineering requirements for the formation of a system of estimate documents in construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(10):1396-1407. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1396-1407 (rus.).

Corresponding author: Irina V. Karakozova, i.kar@inbox.ru.

ВВЕДЕНИЕ

На разных этапах жизненного цикла (ЖЦ) строительного объекта от инвестиционного замысла до ликвидации для обоснования сметных затрат формируются различные виды сметной документации. К первичным видам сметной документации относятся локальные сметные расчеты и локальные сметы, на основе которых при использовании сметных нормативов и расценок получают сметную стоимость отдельных видов или комплексов работ. В зависимости от полноты учета всех условий в сметной документации, влияющих на выполнение работ на объектах капитального строительства (ОКС), можно судить о профессионализме составителей, т.е. проектировщиков и инженеров-сметчиков. Однако не всегда посредством профессионализма возможно решать все вопросы и проблемы. Методическое обеспечение процесса подготовки сметной документации, регламентирующее порядок ее составления, иногда не способствует предоставлению открытой информации о сметных нормативах, порядке применения поправочных коэффициентов для учета условий производства работ, порядке индексации и др. Таким образом, актуальность темы исследования обусловлена наличием отдельных проблем в предоставлении открытой информации о последовательности расчета затрат в сметной документации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При обосновании сметных затрат в строительстве в зависимости от этапа ЖЦ ОКС составляются различные виды сметной документации. Комплектность сметной документации зависит от исходных данных и уровня конкретизации отдельных статей затрат. При этом, как правило, чем выше уровень обобщенности сметного документа, тем ниже уровень его подробности.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 16.02.2008 № 87¹ раздел 11 «Смета на строительство объектов капитального строительства» должен содержать текстовую часть в составе пояснительной записки к сметной документации и непосредственно сметную документацию, состоящую из сводки затрат, сводного сметного расчета стоимости строительства, объектных и локальных сметных расчетов (смет), сметных расчетов на отдельные виды затрат. На основе действующих нормативно-методических документов федерального² и территориального³ уровня в табл. 1 приведена последовательность составления сметной документации в зависимости от уровня подробности с указанием формируемых показателей.

В качестве инструмента для определения сметной стоимости в строительстве выступают сметные нормативы — сметные нормы и методики, а также показатели стоимости, к которым относятся расценки, нормативы цены конструктивных решений, нормативы цены строительства. В соответствии с установленными полномочиями Минстроя России согласно Постановлению Правительства РФ от 18.11.2013 № 1038⁴ ежегодно на государственном уровне Минстрой России утверждает План и порядок разработки сметных

¹ О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию : Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 87.

² Об утверждении Методики определения сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства, работ по сохранению объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации на территории Российской Федерации : Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 04.08.2020 № 421/пр.

³ ТСН-2001.12. Общие указания по применению ТСН-2001.

⁴ О Министерстве строительства и жилищно-коммунального хозяйства России : Постановление Правительства РФ от 18.11.2013 № 1038.

нормативов и показателей. Они подлежат обязательному применению при определении сметной стоимости ОКС, строительство которых финансируется с привлечением средств федерального бюджета.

Общие правила составления основных видов сметной документации с использованием сметных нормативов и показателей приведены в Методике определения сметной стоимости строительства, ре-

конструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства, работ по сохранению объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации², а также в ряде других методических документов, регламентирующих порядок применения сметных нормативов и показателей при составлении сметной документации.

Табл. 1. Последовательность составления сметных документов в строительстве

Table 1. The sequence of drawing up estimated documents in construction

Наименование сметного документа Name of the estimate document	Цель составления сметного документа The purpose of drawing up an estimate document
Калькуляция Calculation	Определение сметной цены ресурса, используемой при выполнении работ в строительстве, или показателей основных статей затрат в составе прямых затрат, приводимых в единичной расценке на отдельный вид работ Determination of the estimated price of the resource used in the performance of works in construction or indicators of the main cost items as part of direct costs given in a single price for a separate type of work
Локальные ресурсные ведомости Local resource statements	Определение номенклатуры и расхода ресурсов, используемых при выполнении работ Determination of the nomenclature and consumption of resources used in the performance of work
Локальные сметные расчеты (сметы) Local estimates (estimates)	Установление сметной стоимости отдельных видов работ в составе основного или вспомогательного объекта Determination of the estimated cost of certain types of work as part of the main or auxiliary object
Объектные сметные расчеты (сметы) Object estimates (estimates)	Определение сметной стоимости основного или вспомогательного объектов Determination of the estimated cost of the main or auxiliary facilities
Сметные расчеты на отдельные виды затрат Estimated calculations for certain types of costs	Расчет величины прочих затрат Calculation of the amount of other costs
Сводный сметный расчет стоимости строительства Summary estimate of the construction cost	Расчет сметной стоимости ОКС в соответствии с принятым проектным решением Calculation of the estimated cost of the capital construction object in accordance with the adopted design decision
Сводка затрат Cost summary	Формирование общей сметной стоимости ОКС производственного и непроизводственного назначения Formation of the total estimated cost of capital construction facilities for industrial and non-industrial purposes
Сметные расчеты с использованием нормативов цены конструктивных решений Estimated calculations using the standards of the price of constructive solutions	Формирование стоимости комплекса работ Formation of the cost of the complex of works
Сметные расчеты с использованием нормативов цены строительства Estimated calculations using construction price standards	Формирование стоимости ОКС Formation of the cost of capital construction projects

К первичным сметным документам в строительстве с высоким уровнем подробности относятся калькуляции сметных цен и расценок, а также локальные сметные расчеты (локальные сметы). Для составления калькуляции, как правило, используются конкретные производственные данные о стоимости и расходе ресурсов в сочетании со сметными нормативами. При этом они составляются в том случае, когда в составе действующих сметных нормативов отсутствуют цены на ресурсы или расценки на отдельные виды (комплексы) работ. Подтверждаемые калькуляциями индивидуальные сметные нормативы, которые в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 могут быть разработаны и применены при строительстве конкретного объекта по предусматриваемым в проектной документации технологиям производства работ, условиям труда и поставок ресурсов, отсутствующим или отличным от технологий, учтенных в сметных нормативах, содержащихся в федеральном реестре сметных нормативов, формируются только по решению Правительства РФ.

Самыми востребованными сметными документами являются локальные сметы и локальные сметные расчеты. Данные документы содержат информацию о наименовании и объеме работ, стоимостных показателях элементов прямых затрат, накладных расходов, сметной прибыли, информацию о применении поправочных коэффициентов и порядке индексации, о порядке учета материальных ресурсов, не учтенных расценкой и др. Кроме того, для территориального уровня на примере г. Москвы эти документы учитывают дополнительные затраты, связанные с производством работ в зимнее время. Наполнение форм локальных сметных расчетов (локальных смет) в настоящее время зависит от применяемого метода определения сметной стоимости работ (ресурсного, базисно-индексного или ресурсно-индексного).

Вопросы выбора форм для составления сметной документации, методов расчета сметной стоимости работ, оптимизации сметных затрат, управления стоимостью в строительстве продолжают волновать как ученых, так и начинающих исследователей. К примеру, изучением этих вопросов занимаются: О.В. Дидковская [1–3], В.Ю. Ляпин [4], К.И. Алексеева [5], О.С. Голубова [6, 7], И.В. Лагута [8], Г.Б. Поповок [9], А.А. Черникова [10], Э.Р. Мухаррамова [11, 12], М.М. Кедрова [13].

Таким образом, формы первичных сметных документов, используемые при расчете сметной стоимости работ в строительстве, должны полностью соответствовать требованиям в части отражения полных и достоверных затрат в строительстве. Целесообразно создать единый комплект форм всех видов сметной документации, в том числе локальных сметных расчетов (смет), применяемых на всех уровнях (федеральном, территориальном, отраслевом),

а также подготовить и внедрить в практику составления всех форм сметных документов систему управления требованиями к сметной документации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно ГОСТ Р 57306-2016⁵ под инжинирингом следует понимать инженерно-консультационную деятельность, направленную на решение инженерных задач, связанных с созданием или совершенствованием продукции, систем и/или процессов. В связи с этим инжиниринг требований — это инженерно-консультационная деятельность, непосредственно связанная с прогнозированием и учетом всех изменений в соответствии с установленными требованиями.

Переводя эти термины и определения в интересующую нас плоскость, под предметом инжиниринга можно понимать интеллектуальную деятельность, связанную с созданием или совершенствованием системы сметных документов в строительстве, разработкой организационной схемы взаимодействия всех участников данного процесса, а также формированием требований и управлением ими для учета всех изменений.

Создание набора требований представляет собой подготовительный процесс, от которого зависят степень и качество разработанной сметной документации, а также ее соответствие уровню и требованиям пользователей в вопросах оптимизации сметных затрат в строительстве.

Под инжинирингом требований будем понимать объединение двух процессов — формирования требований и управления ими. Процесс формирования требований включает сбор требований в зависимости от исследуемого объекта, которым в рамках настоящих изысканий будет выступать сметная документация. Затем должно происходить извлечение требований, их фиксирование, преобразование, конкретизация и анализ.

В соответствии со Словарем терминов стоимостного инжиниринга⁶ и работой [14] под требованием нужно понимать согласованный набор измеримых желаний и потребностей заказчика. Итак, при разработке требований к сметной документации целесообразно учитывать три группы требований в зависимости от заинтересованной стороны, а именно:

⁵ ГОСТ Р 57306-2016. Инжиниринг. Терминология и основные понятия в области инжиниринга: утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30.11.2016 № 1907-ст.

⁶ Словарь терминов стоимостного инжиниринга. Основы комплексного управления стоимостью. Общая справочная информация. AACE INTERNACIONAL Международная Ассоциация развития стоимостного инжиниринга / пер. под ред. проф. д.т.н. А.В. Цветкова. М., 2018.

требования законодательства, заказчика и системы менеджмента качества. Такое деление требований в зависимости от уровня иерархии улучшает их понимание, схему взаимодействия и управление ими.

При создании системы требований к сметной документации необходимо соблюдать следующие принципы:

- однозначности, когда формулирование требования не допускает разнообразия в понимании объекта, о котором идет речь;
- четкости и сбалансированности, цели четко сформулированы и определены желаемые результаты для всех заинтересованных сторон процесса;
- полноты, в этом случае требование представляет собой законченную мысль;
- корректности, при этом предъявляемые требования не должны противоречить правилам, установленным законодательными, нормативными, техническими, методическими документами;
- актуальности, а именно отражение в описываемом требовании реалий настоящего времени;
- измеримости результатов, когда полученные результаты соответствуют поставленной цели и есть возможность сопоставить их с плановыми показателями.

В табл. 2 приведены этапы формирования системы требований к сметной документации, процессы внутри этапов, а также показатели результативности, позволяющие оценить реализованный процесс, подготовленные на основе нормативных⁷ и научных источников [15–17].

Одним из важных этапов, приведенных в табл. 2, является начальный этап, на котором выполняется сбор и формирование требований. В настоящее время имеют место различные методы сбора требований, самые распространенные — интервьюирование, анкетирование, проведение мозговых штурмов, моделирование ситуации. Отдельные требования могут быть прописаны в законодательных или нормативно-методических документах, а также во внутренних организационных документах конкретного исполнителя. Требования формируются в соответствии с интересами и проблемами участников процесса, а также целями, которые они для себя определяют.

Этап структуризации требований связан с процессом увязывания требований в различные группы, например организационные, функциональные требования, требования к продукту и др. Кроме того, этот процесс также связан с этапами декомпозиции и детализации требований, когда могут быть разре-

шены все противоречия в требованиях, предъявляемых заинтересованными сторонами.

Требования характеризуют ту предметную область, для которой будет составлена сметная документация. Эти требования будут описывать объем используемых источников, уровень достоверности и полноты предоставления информации, уровень точности расчетов и др. При этом необходимо учитывать ограничивающие факторы, влияющие на выбор возможности разработки и реализации принимаемого решения. В отдельных ситуациях у заинтересованных сторон, как правило, это относится к заказчику, возникает необходимость вносить изменения в сами требования. Для включения таких изменений в процесс управления требованиями разрабатываются отдельные мероприятия, которые позволяют оперативно оценить последствия вносимых изменений и корректировать принятые решения.

Последний этап, связанный с проверкой реализации требований, позволяет определить уровень полноты, достоверности, последовательности и непротиворечивости разработанных требований к сметной документации.

Состав показателей результативности, приведенный в табл. 2, не является исчерпывающим и может дополняться и изменяться в зависимости от сложившейся ситуации, требований заинтересованных сторон и законодательства к сметной документации.

На рисунке показана схема управления процессами «жизненного цикла» сметной документации. Под ЖЦ здесь следует понимать этапы разработки, проверки, согласования, утверждения и экспертизы сметной документации. Входами в процесс управления служат отдельные группы ресурсов и документов:

- квалифицированный персонал;
- оборудование для оснащения рабочих мест исполнителей, включая программные средства;
- расходные материалы;
- нормативные, методические, технические и распорядительные документы;
- сметные программные комплексы и правовые информационные системы.

На выходе по результатам деятельности на разных этапах ЖЦ будет появляться сметная документация или экспертное заключение. Отдельная роль в процессе отводится показателям результативности, выступающим в роли индикатора, который сигнализирует о верном или ошибочно принятом решении.

Для описания схемы управления процессом ЖЦ сметной документации используется методология функционального моделирования, где в качестве инструмента выступает «диаграмма черепахи» (рис.) [18, 19]. Данный подход широко используется при управлении системой менеджмента качества.

Схема управления процессом включает ряд элементов, к которым относятся вход в процесс и выход из него, ресурсы, управляющие воздействия, а также возможные риски и показатели результативности.

⁷ СТО НП «НОССИ» 3.0-2012. Сметная документация. Требования к составу и оформлению : утв. решением Общего собрания саморегулируемой организации Некоммерческого партнерства «Национальное объединение специалистов стоимостного инжиниринга», протокол № 03-12 от 15.03.2012.

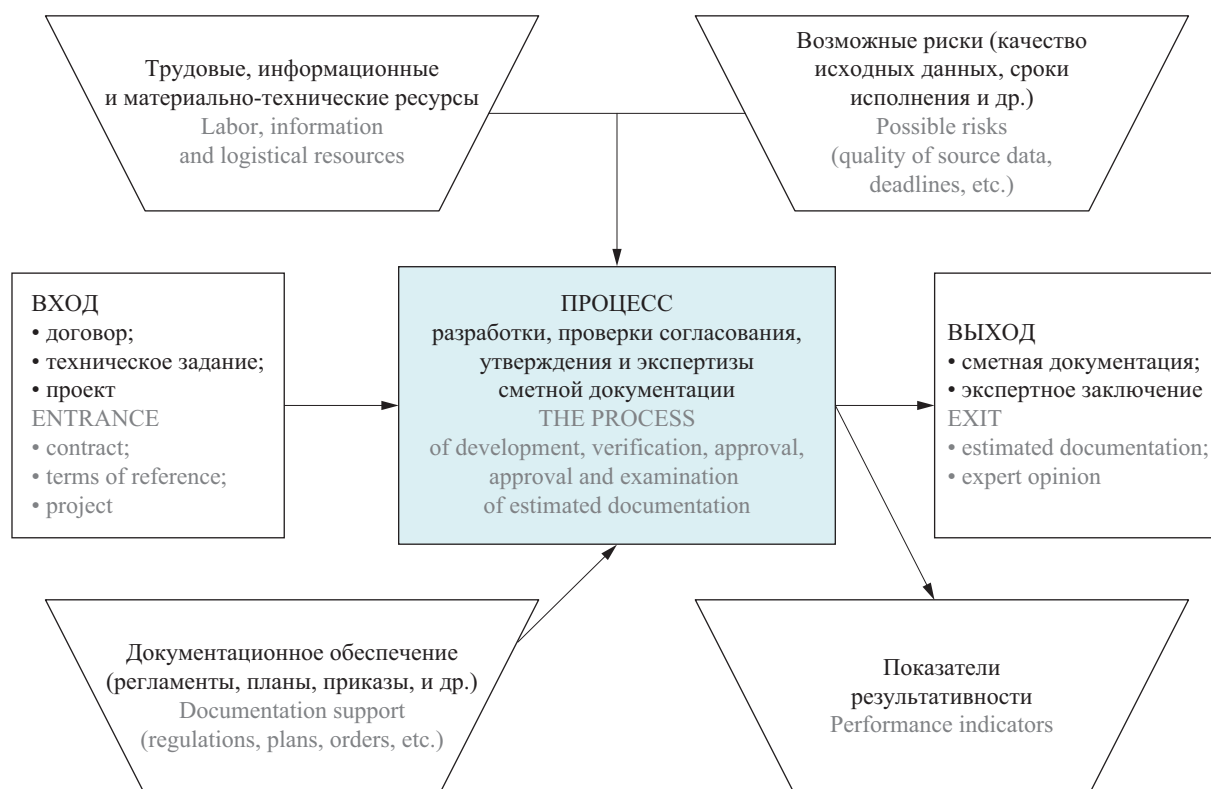
Табл. 2. Этапы разработки системы требований к сметной документации

Table. 2. Stages of development of the system of requirements for the estimate documentation

Этап Stage	Процессы Processes	Показатели результативности процесса Process performance indicators
Сбор и формирование требований Collecting and forming requirements	Сбор требований к сметной документации на основе входящей информации от заинтересованных сторон в процессе подтверждения целесообразности ее составления. Формирование требований к процессу разработки сметной документации в повелительном («должно») и разрешительном («можно») тоне Collection of requirements for the estimate documentation based on incoming information from interested parties in the process of confirming the feasibility of its compilation. Formation of requirements for the process of developing estimate documentation in an imperative (“should”) and permissive (“can”) tone	Уровень доступности информации. Уровень подготовки сметной документации (отношения фактического состояния запланированному) The level of information availability. The level of preparation of the estimate documentation (the ratio of the actual state of the planned)
Структуризация требований Structuring requirements	Структурирование требований позволяет увидеть всю систему в целом. Требования не должны дублировать друг друга, но и допускать отсутствие указания на соблюдение какого-либо требования тоже нельзя Structuring requirements allows you to see the whole system as a whole. Requirements should not duplicate each other, but it is also impossible to allow the absence of an indication of compliance with any requirement	Доля дублируемых требований по отношению к общему числу требований. Уровень интенсивности контроля за соблюдением требований со стороны заказчика The share of duplicated requirements in relation to the total number of requirements. The level of intensity of control over compliance with the requirements by the customer
Декомпозиция требований Decomposition of requirements	Декомпозиция требований включает работы по описанию и группировке процессов, направленных на решение проблем, связанных с управлением сложными процессами, распределив их между участниками процесса The decomposition of requirements includes work on the description and grouping of processes aimed at solving problems related to the management of complex processes, distributing them among the participants of the process	Доля требований, нераспределенных между участниками процесса, по отношению к общему числу требований. Уровень детализации сложных процессов The proportion of claims not distributed among the participants in the process in relation to the total number of claims. The level of detail of complex processes
Детализация требований Specification of requirements	Для детализации требований разрабатывается последовательность действий, включающих как основные, так и вспомогательные операции To detail the requirements, a sequence of actions is developed, including both basic and auxiliary operations	Динамика изменения доли основных операций по отношению к вспомогательным. Уровень детализации требований Dynamics of changes in the share of main operations in relation to auxiliary ones. Level of detail of requirements
Учет ограничивающих факторов Consideration of limiting factors	При формировании требований необходимо: • выявить факторы, оказывающие влияние на соблюдение комплектности и правил разработки сметной документации в соответствии с действующими нормативно-методическими документами в области ценообразования и сметного нормирования в строительстве, а также на уровень качества создаваемых документов;	Динамика изменения диапазона отклонений от существующих допустимых значений ограничений. Количество выявленных факторов, оказывающих влияние на комплектность сметной документации

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Этап Stage	Процессы Processes	Показатели результативности процесса Process performance indicators
	• фиксировать диапазоны отклонений от существующих допустимых значений ограничений. Это позволит при оценке результативности принимаемых решений в соответствии с установленными требованиями выявить и проанализировать полученные значения отклонений, а также подготовить корректирующие мероприятия - When forming requirements, it is necessary: • to identify the factors influencing compliance with the completeness and rules for the development of estimate documentation in accordance with the current regulatory and methodological documents in the field of pricing and estimate rationing in construction, as well as the quality level of the created documents; • fix ranges of deviations from the existing permissible values of restrictions. This will allow, when evaluating the effectiveness of decisions taken in accordance with the established requirements, to identify and analyze the obtained values of deviations, as well as to prepare corrective measures	Dynamics of changes in the range of deviations from the existing permissible values of restrictions. The number of identified factors affecting the completeness of the estimate documentation
Изменение требований Changing requirements	В процессе изменения проектного решения возможно внесение изменений в сметную документацию. В этом случае в системе управления требованиями необходимо предусмотреть систему мероприятий для контроля за изменениями требований In the process of changing the design solution, it is possible to make changes to the estimate documentation. In this case, it is necessary to provide a system of measures in the requirements management system to monitor changes in requirements	Отношение числа требований, которые подлежали корректировке, к общему количеству требований. Динамика изменений, вносимых в сметную документацию The ratio of the number of requirements that were subject to adjustment to the total number of requirements. Dynamics of changes made to the estimate documentation
Проверка реализации требований Verification of requirements implementation	Для проверки реализации требований, составления аналитических справок и отчетности целесообразно использовать показатели, позволяющие быстро оценить ситуацию и внести корректирующие действия в процесс To verify the implementation of requirements, compile analytical reports and reports, it is advisable to use indicators that allow you to quickly assess the situation and make corrective actions in the process	Отношение числа требований, которые оказались невыполненными, к общему количеству требований. Уровень выполнения нормативных сроков реализации требований. Доля стоимости позиций в сметной документации, требования по которым оказались невыполненными или выполненными не в том объеме или установленном срок, по отношению к общей стоимости работ в соответствии со сметной документацией The ratio of the number of requirements that were unfulfilled to the total number of requirements. The level of compliance with the regulatory deadlines for the implementation of requirements. The share of the cost of items in the estimate documentation, the requirements for which were unfulfilled or not fulfilled to the extent or on time, in relation to the total cost of work in accordance with the estimate documentation



Управление процессами «жизненного цикла» сметной документации на основе «диаграммы черепахи»
 Management of the processes of the «life cycle» of the estimate documentation based on the «turtle diagram»

Для минимизации временных затрат на реализацию процесса прохождения экспертизы сметной документации следует пересмотреть процесс разработки сметной документации.

Процесс разработки сметной документации включает изучение проектных материалов, сбор исходных данных, изучение требований по составлению сметной документации (уровень цен, условия выполнения работ, метод расчета сметной стоимости работ, порядок индексации, состав сметной документации и др.), выбор форм сметных документов, составление комплекта сметной документации, учет лимитированных и прочих затрат и др.

К составу и оформлению сметной документации предъявляются требования относительно [1–6, 8, 15–17]:

- комплектности сметной документации в соответствии с классификационными группами ОКС;
- форм сметных документов с целью отражения последовательности формирования статей затрат в сметной стоимости;
- структурирования сметной документации;
- шифрации и нумерации сметной документации;
- обоснованности выбора сметных нормативов для расчета сметных затрат в строительстве;
- полноты и достоверности информации в составе пояснительной записки к сметной документации;

- уровня цен, соответствующего техническому заданию на разработку сметной документации;
- учета условий производства работ в формируемой сметной стоимости;
- учета косвенных и лимитированных затрат;
- округления результатов вычислений в соответствии с действующими нормативно-методическими документами в области ценообразования и сметного нормирования в строительстве;
- требований к оформлению сметной документации, передаваемой на бумажных и электронных носителях, в том числе их соответствию в электронной форме и на бумажных носителях и др.

Исходя из перечисленных выше основных видов требований, можно отметить, что их систематизация и структурирование напрямую зависят от источников получения информации, а также от приоритетности и ценности, которую они представляют для заинтересованных сторон.

Однако при разработке требований можно обнаружить их несоответствие функциональному набору действий. Чтобы избежать появления такого несоответствия рекомендуется составлять матрицу взаимосвязей (взаимовлияния) элементов системы требований [20–22]. В табл. 3 на примере первичного сметного документа — локальной сметы приведены варианты интерпретации состояния наблюдаемого элемента, в качестве которого выступает локальная смета.

Табл. 3. Варианты интерпретации состояния наблюдаемого элемента — локальной сметы
 Table 3. Варианты интерпретации состояния наблюдаемого элемента — локальной сметы

Наблюдение Observation	Оценка Evaluation	Причина Reason	Предложение Offer
Локальная смета составлена The local estimate is made	В локальной смете учтены все виды работ и затрат полностью The local estimate takes into account all types of work and costs in full	Учтено по причине предоставления полной информации об объекте капитального строительства и учете стоимости работ и затрат Taken into account due to the provision of complete information about the capital construction object and accounting for the cost of work and costs	Передать на согласование Submit for approval
	В локальной смете учтены не полностью все виды работ и затрат The local estimate does not fully take into account all types of work and costs	Отсутствует информация о планировании выполнения отдельных строительно-монтажных работ There is no information about the planning of individual construction and installation works	Передать на доработку Submit for revision
		Отсутствует информация об используемом методе расчета сметной стоимости работ There is no information about the method used to calculate the estimated cost of work	Направить заказчику для решения вопроса о выборе метода расчета сметной стоимости работ Send to the customer to resolve the issue of choosing a method for calculating the estimated cost of work
		Отсутствует информация о порядке индексации сметной стоимости There is no information about the procedure for indexing the estimated cost	Направить запрос заказчику, проверить техническое задание на наличие соответствующей информации Send a request to the customer, check the terms of reference for the availability of relevant information
		Не применены в локальных сметах поправочные коэффициенты для учета условий производства работ Correction factors have not been applied in local estimates to take into account the conditions of work	Передать на доработку Submit for revision
	В локальной смете не учтены все виды работ и затрат The local estimate does not take into account all types of work and costs	Отсутствует ведомость объемов работ в составе проектной документации There is no statement of the scope of work as part of the project documentation	Сообщить заказчику и ждать принятого им решения Inform the customer and wait for their decision
		Отсутствует информация в проектной документации об используемых материальных ресурсах There is no information in the project documentation about the material resources used	Сообщить заказчику и ждать от него спецификацию на материальные ресурсы Inform the customer and wait for a specification for material resources from him

Таким образом, формирование требований к сметной документации базируется на технических процессах, определяющих совокупность работ по улучшению функционирования системы управления стоимостью в строительстве и уменьшения рисков принятия решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагаемый инструмент управления стоимостью посредством использования системы управления требованиями к сметной документации при формировании сметных затрат в строительстве будет способствовать получению следующих результатов:

- оптимизации планирования капитальных вложений;
- обеспечению точности, оперативности и эффективности процесса сметного планирования;
- повышению качества раздела «Смета на строительство» в составе проектной документации;
- оптимизации сметных затрат посредством использования сметных нормативов, учитывающих применяемые технологии в строительстве;

- контролю за разработкой сметной документации путем создания и использования матрицы взаимосвязей (взаимовлияний) элементов;

- исключению неэффективных решений в части некорректного использования сметных нормативов, учета условий производства работ, определения объемов выполняемых работ на начальном этапе;

- снижению сроков проверки сметной документации органами экспертизы;

- созданию механизма, стимулирующего специалистов-сметчиков к непрерывному повышению своего профессионального уровня.

В настоящее время назрела необходимость в систематизации требований к сметной документации, в том числе к формам первичных сметных документов, используемых при расчете сметной стоимости работ в строительстве. Процесс разработки системы управления требованиями к сметной документации должен основываться на информации только из официальных источников (законодательных, нормативно-методических и др.), что позволит формировать сметную документацию в соответствии с установленными принципами относительно ее состава и содержания, а именно актуальной, полной и достоверной.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дидковская О.В., Ильина М.В., Мамаева О.А., Коновалова М.А., Спирина Е.С. Методические подходы к формированию системы стоимостного инжиниринга в строительстве : монография. Самара, 2013. 192 с.
2. Дидковская О.В., Ильина М.В., Мамаева О.А., Коновалова М.А. Сметное ценообразование как основа формирования стоимости строительства : монография. Самара : СГАСУ, 2012. 192 с.
3. Дидковская О.В. Система стоимостного инжиниринга как основа управления стоимостью строительства // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2013. № 1. С. 19–25.
4. Ляпин А.В., Ляпин В.Ю. Современный подход к организации сметной деятельности в строительстве // Научное обозрение. 2016. № 8. С. 251–255.
5. Алексеева К.И. Состав сметной документации. Методы ее разработки // Ученые заметки ТОГУ. 2017. Т. 8. № 3. С. 314–318.
6. Голубова О.С. Анкетирование строительных организаций по вопросам управления стоимостью строительства // Инженерный бизнес : сб. мат. I Междунар. науч.-практ. конф. в рамках 18-й Междунар. науч.-техн. конф. 2021. С. 40–46.
7. Голубова О.С. Совершенствование системы формирования сметной документации в строительстве // Экономика и управление (Минск). 2014. № 4 (40). С. 47–51.
8. Лагута И.В., Старыгина Г.Г., Нестерова А.О. Экономическая эффективность от изменения расценок при анализе сметной документации // Проблемы развития современного общества : сб. науч. ст. 4-й Всерос. науч.-практ. конф. 2019. С. 151–153.
9. Лоповок Г.Б., Грызова И.И. Совершенствование оценки сметной стоимости строительства // Вопросы экономики и управления нефтегазовым комплексом : сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. 2021. С. 149–152.
10. Черникова А.А., Томашук Е.А. Преимущества и недостатки новой методики 421/пр // Приоритетные направления современной науки и образования: актуальные вопросы и достижения : мат. Всерос. науч.-практ. конф. 2021. С. 57–61.
11. Мухаррамова Э.Р. Стоимостной инжиниринг в строительстве // Российское предпринимательство. 2016. Т. 17. № 10. С. 1179–1196. DOI: 10.18334/rp.17.10.35283
12. Мухаррамова Э.Р., Файзуллин И.Э., Ажимова Л.И. Стоимостной инжиниринг: формирование стоимости строительства // Нормирование и оплата труда в строительстве. 2019. № 12. С. 58–71.
13. Кедрова М.М., Суворова А.П. Формирование системы стоимостного инжиниринга в инвестиционно-строительной сфере // Современные научные

исследования и инновации. 2015. № 12 (56). С. 140–143.

14. Основы комплексного управления стоимостью / под ред. А.В. Цветкова / пер. с англ. М. : Изд-во ЗАО «ПМСОФТ», 2013. 374 с.

15. Соловьева Е.В., Душейко П.В., Совков В.И., Лыков А.С. Интеграция BIM-технологий в сферу ценообразования в строительстве посредством применения систем автоматизированного выпуска сметной документации // Экономика и предпринимательство. 2019. № 10 (111). С. 971–973.

16. Евстафьева А.Х., Камалютдинова К.А. Разработка системы стоимостного инжиниринга в строительстве // Глобальная экономика и образование. 2022. Т. 2. № 2. С. 27–35.

17. Рахматуллина Е.С., Майорова Д.С. Применение стоимостного инжиниринга в строительных проектах (на примере «Куба управления» стоимостного инжиниринга) // Иннов: электронный научный журнал. 2018. № 3 (36). С. 19.

18. Мочалина Ю.В. Управление обязательными процессами в железнодорожной промышленности //

Проблемы сертификации, управления качеством и документационного обеспечения управления : сб. мат. Всерос. науч.-практ. конф. 2019. С. 53–56.

19. Куницына А.М. Новые подходы при оценке соответствия системы менеджмента бизнеса предприятий железнодорожной отрасли требованиям ISO/TS 22163 // Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс». URL: <https://interactive-plus.ru/e-articles/569/Action569-473318.pdf>

20. Лыноградский Л.А. Системная матрица. Самара : «Издательство СНЦ РАН», 2013. 92 с.

21. Кудреватых В.В. Особенности управления требованиями в сфере управления проектами в инжиниринговой компании полного цикла // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 8. С. 1175–1190. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1175-1190

22. Дорогань И.А. Управление требованиями при строительстве зданий медицинских организаций // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 8. С. 1046–1056. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1046-1056

Поступила в редакцию 1 сентября 2022 г.

Принята в доработанном виде 21 сентября 2022 г.

Одобрена для публикации 4 октября 2022 г.

О Б АВТОРЕ: **Ирина Викторовна Каракозова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента и инноваций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 655795, Scopus: 57190864252, ResearcherID: AAD-4118-2022, ORCID: 0000-0002-7913-919X; i.kar@inbox.ru.

REFERENCES

1. Didkovskaya O.V., Ilyina M.V., Mamaeva O.A., Konovalova M.A., Spirina E.S. *Methodological approaches to the formation of a system of cost engineering in construction : monograph*. Samara, 2013; 192. (rus.).
2. Didkovskaya O.V., Ilyina M.V., Mamaeva O.A., Konovalova M.A. *Estimated pricing as the basis for the formation of the cost of construction : monograph*. Samara, SSABU, 2012; 192. (rus.).
3. Didkovskaya O.V. Cost engineering system as a basis for construction cost management. *Rationing and Remuneration in Construction*. 2013; 1:19-25. (rus.).
4. Lyapin A.V., Lyapin V.Y. Modern approach to the organization of estimating activity in construction. *Scientific Review*. 2016; 8:251-255. (rus.).
5. Alekseeva K.I. The composition of the estimate documentation. Methods of its development. *Scientific Notes of TOGU*. 2017; 8(3):314-318. (rus.).
6. Golubova O.S. Survey of construction organizations on the management of construction costs. *Engineering Business : collection of materials of the I International Scientific and Practical Conference*

within the framework of the 18th International Scientific and Technical Conference. 2020. 2021; 40-46. (rus.).

7. Holubava V. Improving the estimates documentation in construction. *Economics and Management (Minsk)*. 2014; 4(40):47-51. (rus.).

8. Laguta I.V., Starygina G.G., Nesterova A.O. Economic efficiency from price changes in the analysis of estimate documentation. *Problems of development of modern society : collection of scientific articles of the 4th All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2019; 151-153. (rus.).

9. Lopovok G.B., Gryzova I.I. Improving the estimate of the estimated cost of construction. *Issues of economics and management of the oil and gas complex : collection of articles of the All-Russian Scientific and practical Conference*. 2021; 149-152. (rus.).

10. Chernikova A.A., Tomashuk E.A. Advantages and disadvantages of the new methodology 421/pr. *Priority directions of modern science and education: current issues and achievements : materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2021; 57-61. (rus.).

11. Mukharramova E.R. Cost engineering in construction. *Russian Entrepreneurship*. 2016; 17(10): 1179-1196. DOI: 10.18334/tp.17.10.35283 (rus.).
12. Mukharramova E.R., Fayzullin I.E., Azhimova L.I. Cost engineering: construction price formation. *Rationing and Remuneration in Construction*. 2019; 12:58-71. (rus.).
13. Kedrova M.M., Suvorova A.P. Formation of cost engineering of investment and construction sector. *Modern Scientific Research and Innovation*. 2015; 12(56):140-143. (rus.).
14. *Total Cost Management* / ed. A.V. Tsvetkova / transl. from English. Moscow, Publishing House of CJSC "PMSOFT", 2013; 374. (rus.).
15. Solovieva E.V., Dusheyko P.V., Sovkov V.I., Likov A.S. Development of the concept of resource-information BIM model and its interaction with the pricing system and estimate rationing. *Journal of Economy and entrepreneurship*. 2019; 10(111):971-973. (rus.).
16. Evstafieva A.Kh., Kamalyutdinova K.A. Development of a cost engineering system in construction. *Global Economy and Education*. 2022; 2(2):27-35. (rus.).
17. Rakhmatullina E.S., Mayorova D.S. Application of cost engineering in construction projects (for example, "Cuba management" cost engineering). *Innov: Scientific Electronic Journal*. 2018; 3(36):19. (rus.).
18. Mochalina J.V. Management of mandatory processes in the railway industry. *Problems of certification, quality management and documentation support of management: Collection of materials of the All-Russian Scientific and practical Conference*. 2019; 53-56. (rus.).
19. Kunitsyna A.M. New approaches in assessing the compliance of the business management system of railway industry enterprises with the requirements of ISO/TS 22163. *Scientific Cooperation Center "Interactive plus"*. URL: <https://interactive-plus.ru/e-articles/569/Action569-473318.pdf> (rus.).
20. Lnogradskiy L.A. *System matrix*. Samara, Publishing House of the SNC RAS, 2013; 92. (rus.).
21. Kudrevatykh V.V. Research of requirement management features in the field of project management in a full-cycle engineering company. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1175-1190. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1175-1190 (rus.).
22. Dorogan I.A. Requirements management in the medical building construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(8):1046-1056. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1046-1056 (rus.).

Received September 1, 2022.

Adopted in revised form on September 21, 2022.

Approved for publication on October 4, 2022.

BIONOTES: **Irina V. Karakozova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management and Innovation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 655795, Scopus: 57190864252, ResearcherID: AAD-4118-2022, ORCID: 0000-0002-7913-919X; i.kar@inbox.ru.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте). Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ($\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка источников. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В Сведениях об авторах (Bionotes) представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «Вклад авторов:» (Contribution of the authors:). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

Образец:

Вклад авторов:

Фамилия И.О. — научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы.

Фамилия И.О. — участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Фамилия И.О. — scientific management; research concept; methodology development; participation in development of curricula and their implementation; writing the draft; final conclusions.

Фамилия И.О. — participation in development of curricula and their implementation; follow-on revision of the text; final conclusions.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских 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 DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс *Citethisforme.com*.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т.п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

* если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более — допустимо использовать инициалы.

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи — на английском языке.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке 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:

Артемова 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 notes: **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.

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001

Форма № ПД-4

(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 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 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 2022 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

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) 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 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 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 2022 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

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 14-23), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

