

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5

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

# ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 16. Выпуск 5  
2021**

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

Сквозной номер 150

# VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 16. Issue 5  
2021**

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

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

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

## Тематические рубрики

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

|                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Наименование органа, зарегистрировавшего издание:</b> | Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).<br>Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.                                                                                                                                       |
| <b>ISSN</b>                                              | 1997-0935 (Print)<br>2304-6600 (Online)                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Периодичность:</b>                                    | 12 раз в год                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <b>Учредители:</b>                                       | Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ),<br>129337, Москва, Ярославское ш., д. 26;<br>Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ»,<br>129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1. |
| <b>Выходит при научно-информационной поддержке:</b>      | Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН),<br>Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Издатель:</b>                                         | ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ<br>129337, Москва, Ярославское ш., д. 26.<br>Сайт: <a href="http://www.mgsu.ru">www.mgsu.ru</a><br>E-mail: <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>                                                          |
| <b>Типография:</b>                                       | Типография Издательства МИСИ – МГСУ<br>129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8.<br>Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Сайт журнала:</b>                                     | <a href="http://vestnikmgsu.ru">http://vestnikmgsu.ru</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>E-mail:</b>                                           | <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Тел.:</b>                                             | (495) 287-49-14, доб. 23-93                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Подписка и распространение:</b>                       | Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке.<br>Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989.<br>Цена свободная.                                                                                                                                                                              |
| <b>Подписан в печать</b>                                 | 28.05.2021.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Подписан в свет</b>                                   | 31.05.2021.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 16,05. Тираж 100 экз. Заказ № 87

## 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 РААСН, ректор, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

**Анвер Идрисович Бурханов**, д-р физ.-мат. наук, доц., зав. каф. физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Российская Федерация

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

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

**Йозеф Вичан**, д-р, проф., Университет Жилина, Словацкая Республика

**Забигнев Вуйчицки**, д-р, проф., Вроцлавский технологический университет, Республика Польша

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

**Милан Голицки**, д-р, проф., Институт Клокнера Чешского технического университета в Праге, Чешская Республика

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

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

**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

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

**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, 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., проф. кафедры Технологии вяжущих веществ и бетонов, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**Армен Завенович Тер-Мартirosян**, д-р техн. наук, руководитель научно-образовательного центра «Геотехника», НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

## Редакция журнала

**Выпускающий редактор:** *Анна Александровна Дядичева*

**Редактор:** *Татьяна Владимировна Бердникова*

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

**Корректор:** *Любовь Владимировна Светличная*

**Дизайн и верстка:** *Алина Германовна Алейникова*

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., проф. каф. металлических и деревянных конструкций, проректор, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

## Редакционный совет

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

**Юрий Михайлович Баженов**, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии вяжущих веществ и бетонов, 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**, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р архитектуры, проф., 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, директор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт прикладной механики Российской академии наук», Москва, Российская Федерация

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

**Александр Витальевич Гинзбург**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве, НИУ МГСУ, 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. кафедры 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» (НИУ «МЭИ»), 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**, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., 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, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. каф. геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный

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

**Владимир Львович Мондрус**, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РААСН, 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

**Екатерина Владимировна Нежникова**, д-р экон. наук, доц., проректор, зав. каф. экономики и управления в строительстве, 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., зав. каф. водоснабжения и водоотведения, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

**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

**Евгений Иванович Пупырев**, почетный член Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., консультант каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, 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**, чл.-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., проф., 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., академик и вице-президент РААСН, 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, профессор, 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

**Павел Александрович Хаванов**, д-р техн. наук, проф., проф. каф. теплогазоснабжения и вентиляции, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

# VESTNIK <sup>MGSU</sup>

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

## Thematic sections

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

|                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ISSN</b>                                                                  | 1997-0935 (Print)<br>2304-6600 (Online)                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Publication Frequency:</b>                                                | Monthly                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Founders:</b>                                                             | Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337;<br>Limited Liability Company "ASV Publishing House", 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337. |
| <b>The Journal enjoys the academic and informational support provided by</b> | The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)                                                                                                                                                                                           |
| <b>Publisher:</b>                                                            | Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337<br>Website: <a href="http://www.mgsu.ru">www.mgsu.ru</a><br>E-mail: <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>    |
| <b>Printing House:</b>                                                       | Printing house of the Publishing house MISI – MGSU<br>building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337<br>tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.                                                                                                                                                                      |
| <b>Website journal:</b>                                                      | <a href="http://vestnikmgsu.ru">http://vestnikmgsu.ru</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>E-mail:</b>                                                               | <a href="mailto:vestnikmgsu@mgsu.ru">vestnikmgsu@mgsu.ru</a> , <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Subscription:</b>                                                         | Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Signed for printing:</b>                                                  | 28.05.2021                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)", 2021

## 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

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

**Anver I. Burkhanov**, Volgograd State Technical University, Volgograd, 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

**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:** *Lyubov' V. Svetlichnaya*

**Editor:** *Tat'yana V. Berdnikova*    **Layout:** *Alina G. Aleynikova*

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

## Chairman of the Editorial Board

*Alexander R. Tushin*, 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

**Yuri M. Bazhenov**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 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

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

**Pavel A. Havanov**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 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

**Ekaterina V. Nezhnikova**, 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

**Evgeny I. Pupyrev**, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 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

**Yas'kova N. Yur'evna**, 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

*А.А. Плотников, Г.Р. Гурьянов*

**Современные методы охлаждения многолетнемерзлых грунтовых оснований многоэтажных жилых зданий . . . . . 535**

*В.А. Ильичев, В.И. Колчунов, В.А. Гордон, А.А. Кормина*

**Статистические зависимости показателей благоприятной среды жизнедеятельности биосферосовместимого города . . . . . 545**

*В.Д. Оленьков, А.Д. Бирюков, А.О. Колмогорова*

**Технологии виртуальной реальности для визуализации задач моделирования параметров микроклимата застройки. . . . . 557**

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

*М.Н. Кирсанов, О.В. Воробьев*

**Calculation of the dependence of the spatial cantilever truss vibration frequency on the number of panels (Расчет зависимости частоты колебаний пространственной консольной фермы от числа панелей). . . . . 570**

*С.В. Черемных, С.А. Соколов*

**Решение задачи устойчивости тонкостенных стальных цилиндрических оболочек . . . . . 577**

*А.А. Соловьева, С.А. Соловьев*

**Исследование развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации . . . . . 587**

*З.Г. Тер-Мартirosян, А.С. Акулецкий*

**Взаимодействие свай большой длины с многослойным массивом грунта с учетом упругих и реологических свойств с учетом упрочнения . . . . . 608**

## ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*Мостафа Джафари, Е.М. Кудрявцев*

**Dynamic Simulation of a High Altitude Gantry Crane with Cable Hoisting. Part one. 2D Model (Динамическое моделирование высокого козлового крана с канатным подъемником. Часть 1. 2D-модель) . . . . . 615**

*Г.Н. Громов, Д.Д. Худякова, К.Г. Пьянков*

**Подходы к реализации гидравлических электронных моделей централизованных систем водоснабжения . . . . . 623**

**Требования к оформлению научной статьи . . . . . 635**

# CONTENTS

## ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

*Aleksandr A. Plotnikov, Georgy R. Guryanov*

**Modern methods of cooling permafrost ground beds of multi-storey residential buildings. . . . . 535**

*Vyacheclav A. Ilyichev, Vitaly I. Kolchunov, Vladimir A. Gor-don, Alexandra A. Kormina*

**Statistical relationships between indicators of favourable living  
envi-ronments in biosphere compatible cities . . . . . 545**

*Valentin D. Olenkov, Aleksandr D. Biryukov, Alena O. Kolmogorova*

**Using virtual reality technologies to visualize parameters of urban microclimate. . . . . 557**

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

*Mikhail N. Kirsanov, Oleg V. Vorobyev*

**Calculation of the dependence of the spatial cantilever truss  
vibration frequency on the number of panels . . . . . 570**

*Stepan V. Cheremnykh, Sergei A. Sokolov*

**A solution to the problem of stability of thin-walled steel cylindrical shells . . . . . 577**

*Anastasia A. Soloveva, Sergey A. Solovev*

**A research into the development of models of random variables as part of the structural  
reliability analysis performed in the absence of some statistical information . . . . . 587**

*Zaven G. Ter-Martirosyan, Aleksandr S. Akuleckij*

**Interaction between a long pile and the multilayered soil body with account for elastic  
and rheological properties as well as soil stabilization. . . . . 608**

## ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

*Mostafa Jafari, Evgeniy M. Kudryavtsev*

**Dynamic simulation of a high altitude gantry crane with cable hoisting.  
Part one. 2D Model. . . . . 615**

*Grigory N. Gromov, Darya D. Khudyakova, Kirill G. Pyankov*

**Approaches to the implementation of hydraulic electronic models of centralized water supply systems . . . . . 623**

**Requirements for research paper design . . . . . 635**

## 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:

- 05.02.22 — Организация производства (строительство) (технические науки);
- 05.23.01 — Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 05.23.02 — Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);
- 05.23.03 — Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки);
- 05.23.04 — Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов (технические науки);
- 05.23.05 — Строительные материалы и изделия (технические науки);
- 05.23.07 — Гидротехническое строительство (технические науки);
- 05.23.08 — Технология и организация строительства (технические науки);
- 05.23.16 — Гидравлика и инженерная гидрология (технические науки);
- 05.23.17 — Строительная механика (технические науки);
- 05.23.19 — Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки);
- 05.23.20 — Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (технические науки, архитектура);
- 05.23.21 — Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки, архитектура);
- 05.23.22 — Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки, архитектура);
- 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).

# АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

УДК 624.139

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.535-544

## Современные методы охлаждения многолетнемерзлых грунтовых оснований многоэтажных жилых зданий

А.А. Плотников, Г.Р. Гурьянов

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Несущая способность грунта в мерзлом состоянии значительно выше, чем при положительных температурах. Поэтому использование грунта в мерзлом состоянии в качестве основания здания в районах залегания многолетней мерзлоты вполне оправдано. Однако сохранение мерзлого состояния грунта на застроенной территории является сложной инженерной задачей, несмотря на низкие среднегодовые температуры воздуха (ниже  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

**Материалы и методы.** Исследования формирования температурного режима основания проводились численными методами по программе TEMP. Комплекс разработан в МИСИ – МГСУ (свидетельство о государственной регистрации № 2016618937) для решения нестационарных теплофизических задач энтальпийным методом с учетом фазовых переходов связанной влаги в спектре температур.

**Результаты.** Для сохранения мерзлого состояния грунтов основания зданий применяются два подхода: естественное сезонное поверхностное и глубинное охлаждение с одной стороны и снижение теплового влияния здания на грунты основания, с другой стороны. В первом случае поверхность под зданием непосредственно охлаждается воздухом в зимнее время года при помощи холодного проветриваемого пространства под зданием, так называемого «вентилируемого подполья» (ВП). Глубинное охлаждение осуществляется при помощи сезонно-охлаждающих устройств (СОУ) путем теплообмена воздуха с грунтом через трубы, заполненные теплоносителем и работающие в течение зимнего периода. Снижение теплового влияния здания возможно за счет изменения среднегодовой температуры воздуха в ВП и посредством сезонного утепления стен подполья или поверхности грунтов основания.

**Выводы.** Наиболее эффективным способом сохранения грунтовых оснований многоэтажных жилых зданий в мерзлом состоянии является метод тепловой изоляции поверхности грунтового основания в сочетании с глубинными жидкостными охлаждающими устройствами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** охлаждение грунтов, вентилируемое подполье, сезонно-охлаждающие устройства, жидкостные, парожидкостные, глубинное охлаждение грунтов, поверхностное охлаждение грунтов, фундаменты, теплоизоляция фундаментов

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за содержательную рецензию и редактору, помогающему оформить статью.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Плотников А.А., Гурьянов Г.Р. Современные методы охлаждения многолетнемерзлых грунтовых оснований многоэтажных жилых зданий // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 5. С. 535–544. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.535-544

## Modern methods of cooling permafrost ground beds of multi-storey residential buildings

Aleksandr A. Plotnikov, Georgy R. Guryanov

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The bearing capacity of soil in the frozen state is much higher than its bearing capacity at positive temperatures. Therefore, it makes sense to use frozen soil as the footing of a building in permafrost regions. However, the preservation of soil in the frozen state in a built-up area is a challenging engineering problem despite low average annual air temperatures (below  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

**Materials and methods.** The co-authors employed numerical methods to study the temperature regime of the footing using TEMRA software. This software was developed at MISI – MGSU (State Registration Certificate 2016618937); it solves non-stationary thermophysical problems by the enthalpy method with regard for the phase transitions of the bound moisture in the temperature range.

**Results.** Two approaches are used to preserve building footings in the frozen state: natural seasonal surface cooling and deep cooling, on the one hand, and reducing the thermal effect produced by the building on footing soils, on the other hand. In the first case, the surface under the building is cooled with air in the winter season using the cold ventilated space under the building, the so-called “ventilated basement”. Deep cooling is carried out using Seasonal Cooling Devices (SCD) that

employs air-soil heat exchange with the help of pipes, filled with the heat transfer agent during the winter period. A change in the average annual air temperature inside the ventilated basement and seasonal insulation of its walls or the ground bed can reduce the thermal effect, produced by the building.

**Conclusions.** The most effective way to keep ground beds of multi-storey residential buildings frozen is the thermal insulation of the footing surface in combination with deep liquid cooling devices.

**KEYWORDS:** soil cooling, ventilated basement, seasonal cooling devices (SOC), liquid, vapor-liquid, deep cooling of soils, surface cooling of soils, foundations, thermal insulation of foundations

**Acknowledgements.** The authors are grateful to the anonymous reviewer for the informative review and the editor who helps to prepare the article.

**FOR CITATION:** Plotnikov A.A., Guryanov G.R. Modern methods of cooling permafrost ground beds of multi-storey residential buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(5):535-544. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.535-544 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Несущая способность грунта в мерзлом состоянии значительно выше, чем при положительных температурах. Поэтому использование грунта в мерзлом состоянии в качестве основания здания в районах залегания многолетнемерзлых грунтов вполне оправдано. Однако сохранение мерзлого состояния грунта на застроенной территории является сложной инженерной задачей. Это связано с уничтожением естественного мохо-торфяного покрытия, устройством фильтрующих подсыпок для засыпки оврагов при планировке застраиваемой территории, прокладкой коллекторов для ливневой канализации и инженерных коммуникаций. Особенно опасны протечки канализации в подземных коллекторах, что ведет к засолению грунтов территории. Все это приводит к увеличению слоя, который летом оттаивает до глубины 2 м, а зимой замерзает. В некоторых случаях при глубоком оттаивании грунта за счет инфильтрации талых вод, зимой мерзлота не восстанавливается, и образуются так называемые талики — незамерзшие участки грунта между слоями сезонно промерзающего и многолетнемерзлого грунта или внутри слоя многолетней мерзлоты [1, 2].

Поэтому, несмотря на низкие среднегодовые температуры воздуха (ниже  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), необходимо применять инженерные мероприятия по сохранению мерзлого состояния грунтов и дополнительному охлаждению грунтов под зданиями. В массовом строительстве этого можно добиться только за счет использования естественного холода, а именно охлаждения грунтов наружным воздухом.

### Методы охлаждения мерзлых грунтовых оснований

Для сохранения мерзлого состояния грунтов основания зданий применяются два подхода — естественное сезонное поверхностное и глубинное охлаждение с одной стороны и снижение теплового влияния здания на грунты основания с другой стороны.

### Естественное сезонное поверхностное охлаждение

Наибольшее распространение получил метод поверхностного охлаждения, при котором поверх-

ность под зданием непосредственно охлаждается воздухом в зимнее время года при помощи холодного проветриваемого пространства под зданием, так называемого «вентилируемого подполья» (ВП), как показано на рис. 1 [3]. ВП хорошо себя зарекомендовало с инженерной точки зрения и широко применяется в течение последних 70 лет. Охлаждение грунтов происходит за счет того, что под зданиями температура поверхности ниже по сравнению с открытой территорией, так как отсутствует снеговой покров зимой, а летом нет солнечного перегрева.

Разновидностью ВП являются пространственные конструкции, разделяющие ВП на отдельные отсеки в виде аркад, круглых или прямоугольных труб большого диаметра, вентилируемых каналов (рис. 2, 3). В некоторых случаях для поверхностно-



Рис. 1. Вентилируемое подполье

Fig. 1. Ventilated basement

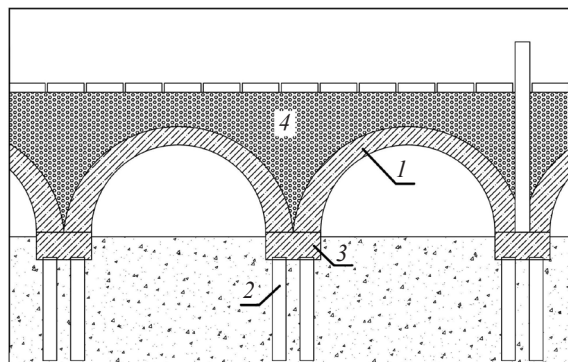


Рис. 2. Охлаждение грунтов основания при помощи аркад: 1 — арки; 2 — сваи; 3 — ростверк; 4 — насыпь

Fig. 2. Using arcades to cool the foundation soil: 1 — arches; 2 — piles; 3 — grillage; 4 — embankment

го охлаждения грунтов основания при больших нагрузках на цокольное перекрытие применяются вентилируемые подсыпки из каменных насыпей типа курумов и т.д. Известны предложения по использованию вентилируемых каналов как поверхностных фундаментов типа складок (фундаменты-оболочки) и других пространственных конструкций, как показано на рис. 4 [4, 5].

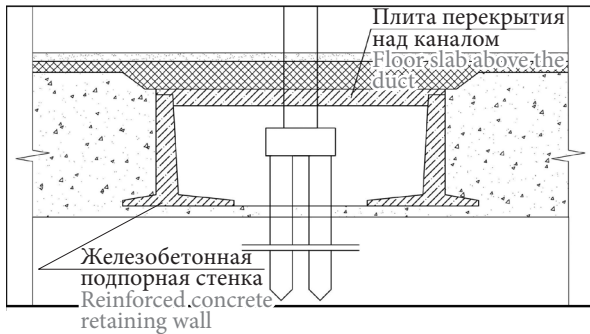


Рис. 3. Вентилируемые каналы

Fig. 3. Ventilated ducts

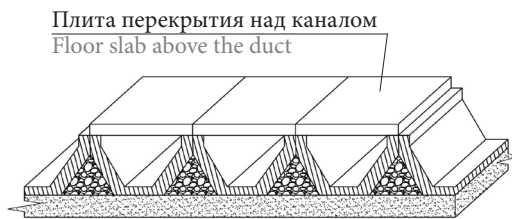


Рис. 4. Вентилируемые фундаменты-оболочки

Fig. 4. Floor slab above the duct

#### Естественное глубинное охлаждение

Глубинное охлаждение осуществляется при помощи сезонно-охлаждающих устройств (СОУ), они представлены на рис. 5, путем теплообмена воздуха с грунтом через трубы, заполненные теплоносителем и работающие в течение зимнего периода. Глубинное охлаждение позволяет охлаждать любую точку основания здания как по глубине, так и в плане, в отличие от поверхностного охлаждения, которое дает возможность охлаждать основания здания только в плане, так как воздействует на грунты основания через планировочную поверхность под зданием.

СОУ делятся на *вертикальные* и *горизонтальные* и конструктивно представляют собой трубу, часть которой находится над землей и обдувается воздухом, а другая часть расположена в грунте, который надо охладить.

По теплоносителю СОУ подразделяют на *жидкостные* и *парожидкостные*. Они отличаются способом переноса тепла. Если это осуществляется за счет циркуляции жидкости, то их именуют жидкостными конвективными термосифонами, а если за счет фазовых превращений жидкого теплоноси-

теля в пар, то такие термосифоны называют испарительными.

*Жидкостные* или однофазные назовем СОУ-1. Теплообмен в них происходит за счет циркуляции теплоносителя, в качестве которого применяются жидкости типа керосина. Конструктивно они выполняются в виде металлических труб диаметром 100–150 мм для снижения сопротивления конвекции и повышения площади теплообмена трубы с грунтом. Проблема конструирования жидкостных термосифонов заключается в том, что в верхней части к наружной стенке должна прилегать «теплая» жидкость, нагретая грунтом, а в нижней части, опущенной в грунт, к наружной стенке должна прилегать «холодная» жидкость, охлажденная воздухом. Причем «холодная» и «теплая» жидкости движутся в разных направлениях и не должны смешиваться. Однако двухтрубную систему с естественной циркуляцией сделать нельзя, она просто не будет работать. Выходом из этого положения являются струнаправляющие устройства, разделяющие потоки внутри трубы [6].

Главные достоинства жидкостных термосифонов с замкнутым циркуляционным контуром — высокая надежность при длительном сроке службы и минимальные расходы на эксплуатацию. Так как давление жидкости внутри трубы равно атмосферному, то нет опасности разгерметизации. Но даже в случае попадания керосина в мерзлый грунт он не растворяется [7]. Недостатком СОУ-1 явля-

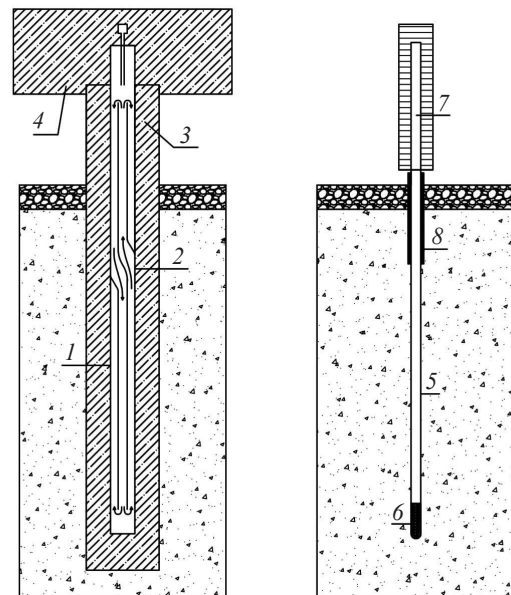


Рис. 5. Конструкция СОУ-1 и СОУ-2: 1 — металлическая труба 120 мм; 2 — струнаправляющее устройство; 3 — железобетонная свая; 4 — ростверк; 5 — труба 50 мм; 6 — теплоноситель в жидком виде; 7 — конденсатор; 8 — утеплитель

Fig. 5. Construction of SCD (Seasonal Cooling Devices) 1 and 2: 1 — metal pipe 120 mm; 2 — stream directing device; 3 — reinforced concrete pile; 4 — grillage; 5 — pipe 50 mm; 6 — liquid heat transfer agent; 7 — condenser; 8 — thermal insulation

ется высокий расход металла, большой объем керосина, повышенные затраты на изготовление и, как следствие, высокая стоимость.

*Парожидкостные* или испарительные СОУ-2 заполняются легкокипящими жидкостями типа фреон. Процесс переноса тепла происходит за счет фазовых переходов жидкости при ее нагревании в грунте и охлаждении в воздухе. Если температура воздуха ниже температуры фазовых переходов жидкости  $t_{\phi}$ , то фреон конденсируется и по стенкам трубы стекает в подземную часть трубы. Нагреваясь в подземной части, фреон переходит в газообразное состояние и поднимается в верхнюю часть трубы. Это позволяет отказаться от струнаправляющих устройств. Температура  $t_{\phi}$  зависит от избыточного давления внутри трубы, и таким образом ее можно регулировать. Циркуляция теплоносителя зависит от разницы температур грунта,  $t_{\phi}$  и воздуха и выбирается из условия:

- $t_{\phi}$  должна быть ниже температуры грунта;
- $t_{\phi}$  должна быть выше температуры наружного холодного воздуха.

Однако, чем ниже  $t_{\phi}$ , тем короче период времени работы СОУ-2, так как это определяется температурой наружного воздуха в холодный период года. Повышая температуру фазовых переходов жидкости, можно удлинить период работы термосифона, но за счет меньшей разницы температур  $t_{\phi}$  и грунта эффективность охлаждения снижается. Температура грунта в рабочей зоне сваи обычно колеблется от  $-1$  до  $-5$  °С, в то время как температура в охлаждаемой воздухом части СОУ достигает  $-50$  °С. Обычно  $t_{\phi}$  выбирают от  $-10$  до  $-15$  °С.

Достоинством СОУ-2 является простота конструкции. Недостаток парожидкостных термосифонов — необходимость поддерживать избыточное давление в трубе. В течение эксплуатации возможны утечки фреона и снижение давления, что приводит к повышению  $t_{\phi}$  и выходу СОУ из строя. Другим недостатком служит малый диаметр трубы, что ухудшает условия теплообмена как с грунтом, так и с наружным воздухом. Для длительного охлаждения грунтов оснований капитальных жилых зданий массового строительства больше подходят термосифоны типа СОУ-1 со сроком службы не менее 50 лет при минимальных расходах на эксплуатацию.

#### Тепловое влияние здания на грунты основания

Снижение теплового влияния здания на грунты основания возможно за счет:

- тепловой изоляции поверхностей ВП;
- изменения температурного режима ВП.

В последнее время развиваются методы, позволяющие уменьшить тепловое влияние здания на грунты основания при помощи тепловой изоляции поверхности грунтов основания и стенок ВП. В исследовании рассмотрен температурный режим основания жилого дома с теплоизоляцией

на полу с учетом регулируемой вентиляции. По результатам расчетов сделан вывод, что «полностью исключить оттаивание грунта под зданием с помощью теплоизоляции без дополнительного охлаждения практически невозможно» [8, 9]. В работе [10] рассматривается применение теплоизоляции в сочетании с глубинными охлаждающими системами в виде пустотелых термопор диаметром 1 м и глубиной 20 м, охлаждаемых холодным воздухом. За счет того, что теплоизоляция расположена исключительно в пределах здания, основание по контуру летом интенсивно нагревается. Идея устройства технического этажа жилого дома серии I-464-ВМ без проветриваемого подполья высказывалась и ранее [11].

Значительно понизить температуру поверхности грунта в холодном подполье возможно за счет снижения среднегодовой температуры воздуха в ВП путем возведения и сезонного утепления поверхности грунтов основания [12–15]. Дальнейшим развитием идеи является устройство съемной теплоизоляции на полу подполья. Зимой теплоизоляция отсутствует, и сопротивление теплопередаче между поверхностью пола и наружным воздухом определяется только сопротивлением теплообмена на поверхности. Дополнительный слой теплоизоляции укладывается, когда температура наружного воздуха становится выше температуры грунта.

Аналогичной ситуации можно достичь, изменив режим вентиляции холодного подполья путем устройства утепленной стенки с изменяемой геометрией, ограждения подполья с регулируемыми продухами (рис. 6). Летом стенки полностью закрыты, а зимой открываются, и остаются щели высотой 20 см в верхней и нижней части, обеспечивающие вентиляцию подполья наружным холодным воздухом.

Устройство постоянной теплоизоляции не дает должного эффекта, так как годовой теплорезерв практически не изменяется. А создание сезонной теплоизоляции требует дополнительных затрат на эксплуатацию здания.

#### Тепловые покрытия

Значительно изменить условия теплообмена на поверхности грунтов в проветриваемом подполье возможно с помощью полупроводниковой теплоизоляции, называемой «тепловыми покрытиями» (ТП). В зимнее время при потоке тепла снизу вверх теплопроводность покрытий определяется конвекцией воздуха, которая летом значительно снижается. Отношение эффективного термического сопротивления ТП летом  $R_1$  и зимой  $R_2$  составляет от 3 до 5. Аналогичным эффектом обладает моховой покров.

Тепловые покрытия не требуют затрат при эксплуатации здания. Реальная конструкция ТП, выполненная из досок с высотой ячеек 15 см, при ширине 20 см, показана на рис. 3. Эксперименты,

проведенные в г. Мирный, показали, что термическое сопротивление такой конструкции составляет летом  $R_n = 0,9 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$ , а зимой  $R_z = 0,3 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$  [6, 7].

Тепловые покрытия представлены на рис. 7.

### Постановка задачи

В настоящей работе изучается возможность сохранения грунтов основания жилого здания в мерзлом состоянии без устройства холодного подполья, только за счет эффективной горизонтальной теплоизоляции и вертикальных охлаждающих устройств, расположенных по краям здания. В качестве СОУ могут быть приняты как жидкостные, так и парожидкостные термосифоны. В данном исследовании в качестве СОУ применяются «холодные» сваи типа СХЯ. Эти сваи отличаются от обычных свай тем, что внутри них встроены жидкостные теплообменники из металлических труб коаксиальной конструкции с естественной циркуляцией теплоносителя. Установка трубы теплообменника внутри железобетонной сваи увеличивает надежность и долговечность устройства. Первый девятиэтажный жилой дом на холодных сваях был построен в г. Мирный в 1970 г. [16]. В отличие от публикации [17], рассматривается возможность получения близкого к стационарному температурному режиму основания. При этом мощность слоя с положительными температурами должна быть минимальна и не выходить

за пределы щебеночной подготовки, а грунты естественного основания должны постоянно находиться в мерзлом состоянии, близком к стационарному.

В предлагаемой модели грунтовый массив основания вне зоны здания сверху ограничен естественной поверхностью, а снизу — зоной годовых колебаний температуры. Под зданием и в наружной отстойке располагается теплоизоляция.

Тепловой баланс основан на следующих предпосылках. Тепло от здания через цокольное перекрытие отводится в грунты основания, а затем удаляется за счет вертикальных охлаждающих устройств, расположенных по боковым границам основания, а также за счет подстилающих мерзлых грунтов, как показано на рис. 8.

Температурный режим грунтов основания здания зависит, прежде всего, от:

- температуры грунта в зоне нулевых годовых амплитуд [17];
- температуры поверхности пола первого этажа;
- геометрических размеров здания (ширины);
- материала теплоизоляции, термического сопротивления теплоизоляции;
- эффективности охлаждения сезонно-охлаждающего устройства.

Предложенные методы охлаждения направлены не на понижение температуры грунтов основания, а на стабилизацию температурного режима грунтов ос-

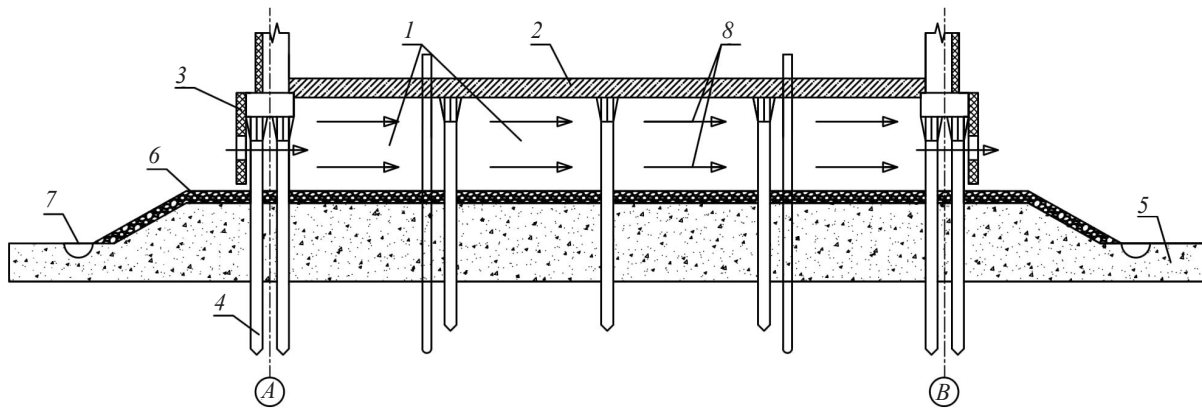


Рис. 6. Проветриваемое подполье с сезонной теплоизоляцией: 1 — проветриваемое подполье; 2 — перекрытие над подпольем; 3 — ограждение подполья с продухами; 4 — свайные фундаменты; 5 — насыпь из непучинистого грунта; 6 — насыпь из щебня; 7 — водоотводной лоток; 8 — направление движения воздуха в подполье

Fig. 6. Ventilated basement that has seasonal thermal insulation: 1 — ventilated basement; 2 — slab over the basement; 3 — basement fencing with air holes; 4 — pile foundations; 5 — embankment made of non-frost-susceptible soil; 6 — crushed rock embankment; 7 — trench drain; 8 — air direction in the basement

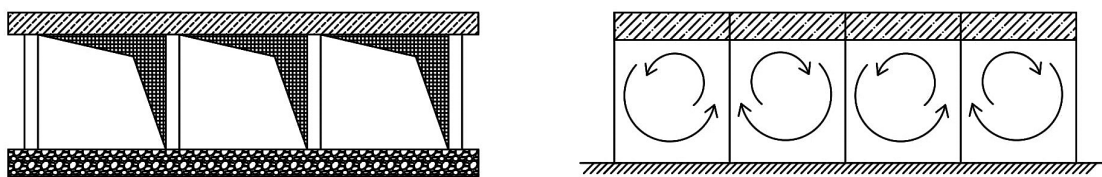


Рис. 7. Реальная конструкция тепловых покрытий и их схема работы

Fig. 7. Real design of thermal coatings and their operation diagram

нования в течение годового цикла. Предлагается вместо поверхностного охлаждения (вариант 1) применить боковое охлаждение массива грунтов основания при помощи СОУ, в сочетании с эффективной теплоизоляцией на границе здание – основание (вариант 2).

В качестве примера рассмотрим НС свайных фундаментов и фундаментной плиты при двух вариантах охлаждения. Свайные фундаменты здания представлены на рис. 8:

- сваи с поверхностным охлаждением при помощи вентилируемого подполья;
- сваи с боковым охлаждением и эффективной теплоизоляцией на поверхности.

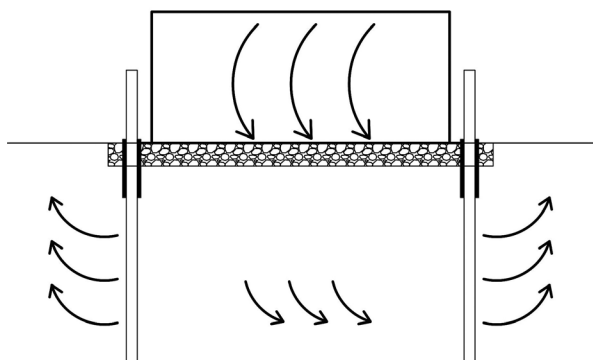


Рис. 8. Конструкция СОУ-1 и СОУ-2: 1 — металлическая труба 120 мм; 2 — струна направляющее устройство; 3 — железобетонная свая; 4 — ростверк; 5 — труба 50 мм; 6 — теплоноситель в жидком виде; 7 — конденсатор; 8 — утеплитель

Fig. 8. Construction of SCD (Seasonal Cooling Devices) 1 and 2: 1 — metal pipe 120 mm; 2 — stream directing device; 3 — reinforced concrete pile; 4 — grillage; 5 — pipe 50 mm; 6 — liquid heat transfer agent; 7 — condenser; 8 — thermal insulation

### Тепловая изоляция поверхности грунтового основания в сочетании с глубинными охлаждающими устройствами

Уменьшения толщины талого слоя под зданием можно достичь путем искусственного охлаждения грунтов основания при помощи горизонтальных труб с холодным теплоносителем (рис. 7). Такое решение в настоящее время широко применяется при строительстве промышленных зданий и сооружений с ограниченными сроками эксплуатации. В последнее время подобные решения распространились и на отдельные большепролетные общественные здания шириной до 100 м (футбольный и ледовый спорткомплекс в г. Якутск) [18–20]. Но такое решение недостаточно надежно для капитальных гражданских зданий с большим сроком эксплуатации и требует дополнительных средств на обслуживание здания.

В статье [21] исследуется возможность сохранения грунтов основания жилого здания в мерзлом состоянии без устройства холодного подполья, только за счет эффективной горизонтальной теплоизоляции

и вертикальных охлаждающих устройств, расположенных по краям здания. В отличие от существующих работ, в статье рассматривается возможность получить близкий к стационарному температурный режим основания. При этом толщина слоя с положительными температурами может располагаться в пределах щебеночной подготовки. В этом случае грунты естественного основания под щебеночной отсыпкой будут постоянно находиться в мерзлом состоянии.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования формирования температурного режима основания проводились численными методами по программе TEMP. Комплекс разработан в МГСУ – МИСИ (свидетельство о государственной регистрации № 2016618937) для решения нестационарных теплофизических задач энтальпийным методом с учетом фазовых переходов связанной влаги в спектре температур.

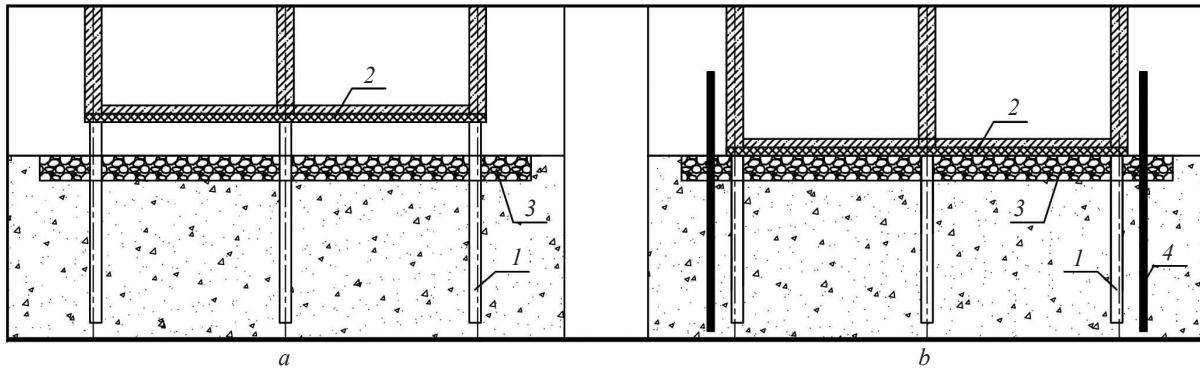
### Численное моделирование

Для проверки предлагаемой модели было выполнено численное моделирование температурного режима грунтового основания здания без холодного подполья (рис. 9, б), с техническим этажом и горизонтальной теплоизоляцией под его полом. Охлаждение грунтов основания осуществлялось вертикальными сезонно-охлаждающими устройствами, расположенными возле наружных стен здания. На рис. 9, а представлено вентилируемое подполье с теплоизоляцией грунта без СОУ.

Поверхность пола технического этажа находится несколько выше планировочной поверхности земли. Под зданием уложена теплоизоляция, выступающая за пределы здания на 1 м. На боковых границах основания рядом с наружными продольными стенами здания установлены вертикальные сезонно-охлаждающие устройства.

Граничные условия на поверхности грунта вне здания задаются в виде синусоиды с амплитудой  $\pm 20$  °С. Температура в зоне нулевых годовых амплитуд на нижней границе массива задается как постоянная  $T_0 = -2$  °С. Распределение температуры по глубине принимается по результатам расчета квазистационарного состояния. На боковых поверхностях массива теплообмен отсутствует [22, 23].

Температура на поверхности пола технического этажа определяется температурой воздуха в техническом этаже, которая в зимний период должна быть положительной. Для удобства эксплуатации коммуникаций, расположенных в техническом этаже, эту температуру можно принять зимой не ниже  $+5$  °С. Летняя температура зависит только от температуры наружного воздуха, и ее принимаем как среднюю за лето  $+15$  °С. В результате ход температуры на полу в техническом этаже задается в виде синусоиды со среднегодовой  $t = +10 \dots \pm 5$  °С. Терми-



**Рис. 9.** Типы фундаментов здания: *a* — сваи с поверхностным охлаждением; *b* — сваи с боковым охлаждением и эффективной теплоизоляцией; 1 — свая; 2 — теплоизоляция; 3 — щебеночная подготовка; 4 — охлаждающие устройства  
**Fig. 9.** Types of building foundations: *a* — surface cooled piles; *b* — side cooled piles that have effective thermal insulation; 1 — pile; 2 — thermal insulation; 3 — crushed rock; 4 — cooling device

ческое сопротивление теплообмену на поверхности принято  $R_s = 0,12 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}$  [24, 2].

На границах основания под наружными продольными стенами здания установлены СОУ. При расчете диаметр труб термосифонов типа СХЯ принят 120 мм при высоте надземной части 3 м. Расстояние между СОУ по длине здания составляло  $b = 1,5 \text{ м}$ . Температура наружного воздуха, охлаждающая трубу, принята соответствующая г. Магадан.

Весь массив представлен разнородными горизонтальными слоями грунта. Под зданием находится бетонная плита толщиной 0,6 м с утеплителем и песчано-гравийная насыпь толщиной 1 м. В качестве теплоизоляции были приняты плиты из жесткого экструдированного пенополистирола с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,04 \text{ Вт/м °С}$ .

### Численные расчеты

Исследования формирования температурного режима основания здания проводились численными методами с использованием программного комплекса ТЕМР. Комплекс разработан в МГСУ на кафедре проектирования зданий и сооружений (свидетельство о государственной регистрации № 2016618937) для решения нестационарных теплофизических задач энтальпийным методом с учетом фазовых переходов связанной влаги в спектре температур.

Трехмерный расчетный массив состоит из элементарных блоков и разделен по глубине на 15 блоков, а в горизонтальной плоскости по ширине на 7 и по длине на 20 блоков. Размеры блоков от 0,75 до 2,0 м с увеличением к периферии.

Учитывая реальные размеры многоэтажных гражданских зданий, рассмотрен температурный режим основания здания шириной  $L = 12, 15$  и 20 м, с термическим сопротивлением теплоизоляции  $R = 6, 8, 10 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}$  и глубиной подземной части термосифона  $h = 6–8 \text{ м}$  (рис. 10).

Температурное поле в основании зданий (координаты  $J = 1 \dots 20$ ) шириной 12 м,  $R = 6 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}$ ,

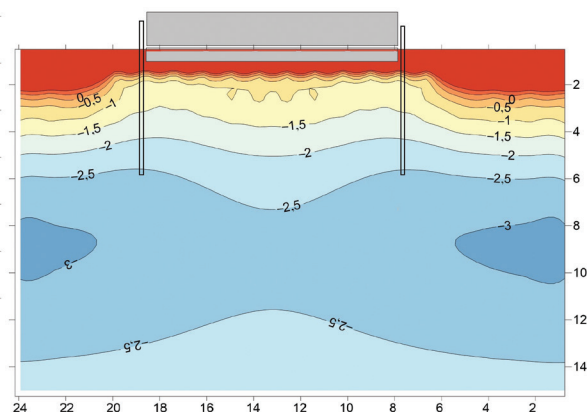
$h = 6 \text{ м}$  на середину сентября 10-го года расчета представлено на рис. 10.

Стабилизация положительных температур в пределах слоя толщиной 1,5 м свидетельствует о возможности строительства зданий не только на свайных фундаментах, вмороженных в грунт, но и на фундаментной плите, если она будет опираться на основание с практически постоянными в течение года характеристиками [25].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Можно отметить, что наиболее интенсивно на глубину оттаивания под зданием влияют геометрические параметры здания, такие как ширина фундаментной плиты, толщина и материал теплоизоляции (термическое сопротивление теплоизоляции).

Изучение температурных полей и значения температур в основании здания на глубине 1,5 м показали, что оптимальные результаты при ширине здания 12 м можно достичь при устройстве теплоизоляции на полу технического этажа толщиной 24 см, что соответствует  $R_f = 6 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}$  и глубине подземной части сезонно-охлаждающего устройства 6 м. Ана-



**Рис. 10.** Температурное поле в основании зданий шириной 12 м и  $R = 6 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}$ ,  $h = 6 \text{ м}$

**Fig. 10.** Temperature field at the footing of buildings: width — 12 m; and  $R = 6 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}$ ,  $h = 6 \text{ м}$

лиз и последующее сравнение температурных полей в основании здания шириной 12 м продемонстрировал, что под зданием с учетом отмостки зона положительных температур составляет не глубже чем 1,5 м и стабильна по всем геометрическим параметрам здания. Вынос утеплителя за пределы осей здания и дополнительное зимнее охлаждение за счет сезонно-охлаждающих устройств позволили уменьшить глубину оттаивания грунта около здания.

Тепловое влияние здания распространяется на глубину до 8–10 м. Ниже этой отметки находится зона нулевых амплитуд, и температура грунта как под зданием, так и вне его изменяется очень незначительно, в основном под влиянием повышения среднегодовой температуры наружного воздуха, ниже 15 м — не изменяется.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты численного моделирования показали, что ограничить глубину деятельного слоя под зданием и стабилизировать температурный режим

мерзлого основания возможно без вентилируемого подполья. Ключевыми параметрами, влияющими на температурный режим, являются ширина здания, термическое сопротивление теплоизоляции, эффективность охлаждения СОУ.

Учитывая повышенные требования к надежности и большой опыт эксплуатации, в качестве СОУ применялись «холодные» сваи типа СХЯ с жидкостными термосифонами, хорошо зарекомендовавшие себя при строительстве в холодных регионах.

Наиболее эффективным способом сохранения грунтовых оснований многоэтажных жилых зданий в мерзлом состоянии служит метод тепловой изоляции поверхности грунтового основания в сочетании с глубинными жидкостными охлаждающими устройствами.

Учитывая тенденцию на повышение среднегодовой температуры наружного воздуха, задача сохранения многолетнемерзлого основания усложняется и требует применения современных решений без использования вентилируемого подполья.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Познаркова С.В., Зепалов Ф.Н. Оценка 20-летней эксплуатации фундамента-оболочки в г. Игарка // Труды IX Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения. Якутск : Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011. 4 с.
2. Примаков С.С., Паздерин Д.С. О расчете теплообмена при проектировании конденсаторной части сезоннодействующего охлаждающего устройства // Нефтяное хозяйство. 2013. № 4. С. 124–125.
3. Горелик Я.Б., Селезнев А.А. Об эффективности оребрения вертикальных двухфазных естественно-конвективных охлаждающих устройств для строительства на мерзлых грунтах // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 2. С. 78–89.
4. Горелик Я.Б., Горелик Р.Я. Лабораторное исследование работы двухфазного естественно-конвективного охлаждающего устройства с горизонтальной испарительной частью // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 2. С. 34–43.
5. Гончаров Ю.М. Жилой дом на поверхностном фундаменте-оболочке // Жилищное строительство. 1982. № 11. С. 11–12.
6. Макаров В.И. Управление температурным режимом мерзлых массивов в северном строительстве // Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств : сб. науч. тр. Якутск : ИМ СО АН СССР, 1983. С. 3–29.
7. Макаров В.И. Термосифоны в северном строительстве. Новосибирск : Наука, 1985. 169 с.
8. Long E.L. The long thermopile // Proc. Intern. Permafrost Conf. USA, 1965. Pp. 487–491.
9. Цуканов Н.А., Баев М.А., Бабух А.П., Поз Г.М. О некоторых характерных особенностях теплового взаимодействия между массивами вечномерзлых грунтов под отапливаемыми зданиями и снаружи при различных условиях снеготложения у фундаментов // Вестник ТюмГАСУ. 2015. № 4. С. 52–59.
10. Аникин Г.В., Плотников С.Н., Спасенникова К.А. Компьютерное моделирование теплопереноса в системах горизонтального охлаждения грунтов // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 1. С. 33–39.
11. Пассек В.В., Набоков А.В., Баев М.А., Мальцева Т.В., Бай В.Ф., Палавошев И.Н. Сочетание применения термоопор и проветриваемого подполья при возведении зданий на вечной мерзлоте // Вестник ТюмГАСУ. 2015. № 4. С. 33–42.
12. Максимов Г.Н., Смирнов В.Д. К вопросу о возведении жилых зданий в районах распространения вечномерзлых грунтов без проветриваемых подполий // Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств : сб. науч. тр. Якутск, 1983. С. 77–81.
13. Plotnikov A.A. Assessment of a possibility of partial use the cold ventilated spaces under buildings in the Permafrost zone // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 032070. DOI: 10.1088/1757-899x/463/3/032070
14. Мельников В.П., Мельникова А.А., Аникин Г.В., Иванов К.С., Спасенникова К.А. Инженерные решения в строительстве на вечной мерзлоте в плане повышения энергоэффективности сооружений // Криосфера Земли. 2014. Т. 18. № 3. С. 82–90.

15. *Perreault P., Shur Y.* Seasonal thermal insulation to mitigate climate change impacts on foundations in permafrost regions // *Cold Regions Science and Technology*. 2016. Vol. 132. Pp. 7–18. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.09.008

16. *Осокин Н.И., Сосновский А.В.* Теплофизические свойства мохового покрова и его влияние на термический режим грунтов на архипелаге Шпицберген // X Международная конференция по мерзлотоведению. Салехард, 2012. Т. 3. С. 391–395.

17. *Melnikov P., Makarov V., Plotnikov A.* The engineering-physical basis of temperature regime regulation of ground massifs in northern construction // *Engineering Geology*. 1981. Vol. 18. Pp. 165–174. DOI: 10.1016/0013-7952(81)90056-9

18. *Gopalakrishnan K., Manik A.* A mathematical model for predicting isothermal soil moisture profiles using finite difference method // *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2007. Vol. 1. No. 1. Pp. 14–20. DOI: 10.5281/zenodo.1332730

19. *Ефимов В.М., Попенко Ф.Е., Рожин И.И., Степанов А.В., Большев К.Н.* Формирование температуры грунтов оснований при использовании сезонно-охлаждающих устройств (СОУ) в условиях криолитозоны центральной Якутии // *Арктика и Антарктика*. 2017. № 4. С. 98–105.

20. *Долгих Г.М., Окунев С.Н., Паздерин Д.С., Гилев Н.Г.* Исследование ТК с использованием кли-

матических камер и в условиях опытно-промышленного полигона // *Материалы международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной XX-летию ООО НПО «Фундаментстройаркос»*. Тюмень, 2011. С. 88–94.

21. *Пермяков П.П., Варламов С.П., Железняк М.Н.* Воздействие вертикального сезонно охлаждающего устройства на тепловлажностный режим грунта // *Криосфера Земли*. 2017. Т. 21. № 1. С. 66–72. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(66-72)

22. *Plotnikov A.A.* Stabilizing the temperature regime of a frozen foundation bed using thermal insulation and cooling mechanisms // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2020. Vol. 57. No. 4. Pp. 329–335. DOI: 10.1007/s11204-020-09674-z

23. *Михайлов П.Ю.* Динамика тепломассообменных процессов и теплосилового взаимодействия промерзающих грунтов с подземным трубопроводом: автореферат дис. ... канд. физико-математических наук. Тюмень, 2012. 21 с.

24. *Амосова Е.В., Кропачев Д.Ю., Паздерин Д.С.* Система мониторинга температур протяженных объектов в многолетнемерзлых грунтах // *Газовая промышленность*. 2011. № 6 (660). С. 42–45.

25. *Долгих Г.М.* Системы температурной стабилизации грунтов оснований в криолитозоне: актуальные вопросы исследований, расчетов, проектирования, производства, строительства, авторского надзора и мониторинга. Новосибирск : Гео, 2014. 215 с.

Поступила в редакцию 4 ноября 2020 г.

Принята в доработанном виде 17 мая 2021 г.

Одобрена для публикации 17 мая 2021 г.

Об авторах: **Александр Александрович Плотников** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры проектирования зданий и сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 802309; plaa@zmail.ru;

**Георгий Романович Гурьянов** — магистр, аспирант кафедры проектирования зданий и сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1050517; lnxx@bk.ru.

## REFERENCES

1. *Poznarkova S.V., Zepalov F.N.* Assessment of the 20-year operation of the shell foundation in Igarka. *Proceedings of the IX International Symposium on the Problems of Engineering Permafrost*. Yakutsk, Publishing house of IMZ SB RAS, 2011; 4. (rus.).

2. *Primakov S.S., Pazderin D.S.* Heat exchange calculation at the design of the condenser of seasonally acting cooler unit. *Oil Industry*. 2013; 4:124-125. (rus.).

3. *Gorelik Ya.B., Seleznev A.A.* About efficiency of the condenser finning of the short vertical thermostatizer for building on permafrost. *Earth's Cryosphere*. 2016; 20(2):78-89. (rus.).

4. *Gorelik Ya.B., Gorelik R.Ya.* Laboratory study of the operation of a two-phase natural convective cooling device with a horizontal evaporative part. *Earth's Cryosphere*. 2011; 15(2):34-43. (rus.).

5. *Goncharov Yu.M.* Residential building on a surface shell foundation. *Housing Construction*. 1982; 11:11-12. (rus.).

6. *Makarov V.I.* Temperature control of frozen areas in northern construction. *Regulation of the temperature of base soils using seasonal cooling devices: collection of scientific papers*. Yakutsk, IM SO AN SSSR, 1983; 3-29. (rus.).

7. Makarov V.I. *Thermosiphons in northern construction*. Novosibirsk, Nauka, 1985; 169. (rus.).
8. Long E.L. The Long thermopile. *Proc. Intern. Permafrost Conf. USA*, 1965; 487-491.
9. Tsukanov N.A., Baev M.A., Babukh A.P., Poz G.M. Some features of thermal interaction between permafrost soil masses under and outside the heated buildings in different conditions of snow deposition near the foundation. *TyumGASU Bulletin*. 2015; 4:52-59. (rus.).
10. Anikin G.V., Plotnikov S.N., Spasennikova K.A. Computer modeling of heat and mass transfer in horizontal soil cooling systems. *Earth's Cryosphere*. 2011; 15(1):33-39. (rus.).
11. Passek V.V., Nabokov A.V., Baev M.A., Maltseva T.V., Bai V.F., Palavoshev I.N. Combination of thermal-control bearings and ventilated underfloor spaces for building on permafrost. *TyumGASU Bulletin*. 2015; 4:33-42. (rus.).
12. Maksimov G.N., Smirnov V.D. On the question of the construction of residential buildings in areas where permafrost soils are spread without ventilated subfields. *Temperature control of base soils with seasonal cooling devices: collection of scientific papers*. Yakutsk, 1983; 77-81. (rus.).
13. Plotnikov A.A. Assessment of a possibility of partial use the cold ventilated spaces under buildings in the Permafrost zone. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 463:032070. DOI: 10.1088/1757-899x/463/3/032070
14. Melnikov V.P., Melnikova A.A., Anikin G.V., Ivanov K.S., Spasennikova K.A. Engineering solutions for building on permafrost in perspective energy-efficient enhancement. *Earth's Cryosphere*. 2014; 18(3):82-90. (rus.).
15. Perreault P., Shur Y. Seasonal thermal insulation to mitigate climate change impacts on foundations in permafrost regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2016; 132:7-18. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.09.008
16. Osokin N.I., Sosnovsky A.V. Thermophysical properties of the moss cover and its influence on the thermal regime of soils in the Spitsbergen archipelago. *X International Conference on Permafrost*. Salekhard, 2012; 3:391-395. (rus.).
17. Melnikov P., Makarov V., Plotnikov A. The engineering-physical basis of temperature regime regulation of ground massifs in northern construction. *Engineering Geology*. 1981; 18:165-174. DOI: 10.1016/0013-7952(81)90056-9
18. Gopalakrishnan K., Manik A. A Mathematical model for predicting isothermal soil moisture profiles using finite difference method // *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2007; 1(1):14-20. DOI: 10.5281/zenodo.1332730
19. Efimov V.M., Popenko F.E., Rozhin I.I., Stepanov A.V., Bolshev K.N. Formation of the temperature of the soils of the bases when using seasonal cooling devices (SOC) in the permafrost zone of central Yakutia. *Arctic and Antarctica*. 2017; 4:98-105. (rus.).
20. Dolgikh G.M., Okunev S.N., Pazderin D.S., Gilev N.G. Investigation of TC using climatic chambers and in the conditions of a pilot industrial test site. *Materials of the international scientific and practical conference on engineering permafrost, dedicated to the XX anniversary of LLC NPO "Fundamentstroyarkos"*. Tyumen, 2011; 88-94. (rus.).
21. Permyakov P.P., Varlamov S.P., Zhelezniak M.N. Influence of vertical seasonal cooling device on soil heat and moisture transfer. *Earth's Cryosphere*. 2017; 21(1):66-72. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(66-72) (rus.).
22. Plotnikov A.A. Stabilizing the temperature regime of a frozen foundation bed using thermal insulation and cooling mechanisms. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2020; 57(4):329-335. DOI: 10.1007/s11204-020-09674-z
23. Mikhailov P.Yu. *Dynamics of heat and mass transfer processes and heat-power interaction of freezing soils with an underground pipeline: abstract of thesis. ... candidate of physical and mathematical sciences*. Tyumen, 2012; 21. (rus.).
24. Amosova E.V., Kropachev D.Yu., Pazderin D.S. Temperature monitoring system for extended objects in permafrost soils. *Gas Industry*. 2011; 6(660):42-45. (rus.).
25. Dolgikh G.M. *Systems for temperature stabilization of foundations in the permafrost zone: topical issues of research, calculations, design, production, construction, field supervision and monitoring*. Novosibirsk, Geo Publ., 2014; 215. (rus.).

Received November 4, 2020.

Adopted in revised form on May 17, 2021.

Approved for publication on May 17, 2021.

BIONOTES: **Aleksandr A. Plotnikov** — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Design of Buildings and Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 802309; plaa@zmail.ru;

**Georgy R. Guryanov** — master, postgraduate of the Department of Design of Buildings and Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1050517; lnxx@bk.ru.

## Статистические зависимости показателей благоприятной среды жизнедеятельности биосферосовместимого города

В.А. Ильичев<sup>1,2</sup>, В.И. Колчунов<sup>3,2</sup>, В.А. Гордон<sup>4</sup>, А.А. Кормина<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН); г. Москва, Россия;

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

<sup>3</sup> Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ); г. Курск, Россия;

<sup>4</sup> Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева); г. Орел, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Национальными целями и стратегическими задачами Российской Федерации определено создание благоприятной, комфортной и безопасной среды жизнедеятельности города. В соответствии с поставленными государством целями и задачами в ближайшей перспективе необходимо обеспечить кардинальное повышение комфортности городской среды и индекса ее качества, сокращение количества городов с неблагоприятной средой жизнедеятельности. Ухудшающаяся во многих городах экологическая обстановка ставит задачу разработки новых принципов жизнедеятельности города, регламентирующих биосферную совместимость городов и развитие человеческого капитала.

**Материалы и методы.** Теоретическую базу исследования составляет парадигма жизнедеятельности — биосферосовместимых городов и поселений, развивающих человека, и ее фундаментальные положения об оценке социального положения и прогресса в развитии человека и о внедрении социальных стандартов в общественные отношения. Практическим инструментарием решения поставленной задачи служат методы корреляционно-регрессионного анализа, которые использованы для выявления статистических зависимостей зависимых и независимых переменных взаимодействующих факторов по социальным и демографическим показателям в жилых районах (микрорайонах/кварталах) муниципальных образований.

**Результаты.** Предложена новая система показателей оценки состояния среды жизнедеятельности, расширяющая традиционное представление о градостроительном проектировании и качестве жизни на урбанизированных территориях, базирующаяся на принципе удовлетворения рациональных потребностей человека функциями города. На основании полученных статистических данных обеспеченности городскими функциями 17 жилых микрорайонов 15 городов РФ произведен выбор вида регрессионной модели и дана численная оценка ее параметров. Результаты проведенного корреляционно-регрессионного анализа зависимых и независимых переменных являются обоснованием выбора наиболее значимых взаимодействующих факторов и построения на их базе статистических моделей, прогнозирующих наиболее благоприятные условия жизнедеятельности.

**Выводы.** Выявленные статистические закономерности отражают уровень обслуживания населения жилых районов (микрорайонов/кварталов) и служат предметом дальнейшей научной дискуссии по обоснованию показателей комфортности и безопасности городской среды и обсуждения многофакторных процессов жизнедеятельности биосферосовместимого города.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** среда жизнедеятельности, биосферосовместимый город, жилые районы (микрорайоны/кварталы), комфорт, безопасность, благоприятные условия, корреляционно-регрессионный анализ, статистические зависимости, прогнозирование

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет средств государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» на плановый период 2021–2022 гг. в рамках Плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН на 2021 год.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Ильичев В.А., Колчунов В.И., Гордон В.А., Кормина А.А. Статистические зависимости показателей благоприятной среды жизнедеятельности биосферосовместимого города // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 5. С. 545–556. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.545-556

## Statistical relationships between indicators of favourable living environments in biosphere compatible cities

Vyacheclav A. Plyichev<sup>1,2</sup>, Vitaly I. Kolchunov<sup>3,2</sup>, Vladimir A. Gordon<sup>4</sup>, Alexandra A. Kormina<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAACS); Moscow, Russian Federation;

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

<sup>3</sup> Southwest State University (SWSU); Kursk, Russian Federation;

<sup>4</sup> Orel State University named after I.S. Turgenev; Orel, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction.** National goals and strategic objectives of the Russian Federation encompass the development of comfortable and safe urban environments. Pursuant to the goals and objectives, set by the state, the comfort of urban environments must be improved and the value of its quality index must go up, while the number of cities having unfavorable living environments must go down in the short term. Environmental deterioration, which is underway in many cities, sets the task of developing new urban living principles that regulate the biosphere compatibility of cities and the development of human capital.

**Materials and methods.** The theoretical basis of this research project is the paradigm of life activities — biosphere-compatible cities and settlements capable of developing humans, as well as its fundamental provisions concerning the assessment of social standing, the pace of human development, and the application of social standards to public relations. Practical tools, that may be used to solve this problem, include the correlation and regression analysis that serves to identify the statistical relationships between dependent/independent variables of interacting factors and social and demographic indicators of residential areas (micro-districts/blocks) in municipalities.

**Results.** The co-authors propose a new system of indicators, that will be used to assess the condition of the living environment. It expands the traditional notions of urban planning and quality of life in urbanized territories following the principle of urban functions employed to satisfy rational human needs. Statistical data on the availability of urban functions in 17 residential districts of the 15 cities of the Russian Federation was analyzed to choose the type of the regression model and perform the numerical evaluation of its parameters. The results of the correlation and regression analysis of dependent and independent variables, performed in this paper, substantiate the choice of the most significant interacting factors and their rightful contribution to statistical models used to forecast most favorable living conditions.

**Conclusions.** Statistical patterns, identified by the co-authors, are indicative of the level of services provided to the population of residential areas (micro-districts/blocks); they will be the subject matter of further scientific discussions to be focused on the substantiation of indicators of comfort and safety of urban environments and multifactorial processes of life activities in biosphere-compatible cities.

**KEYWORDS:** living environment, biosphere-compatible city, residential areas (micro-districts/blocks), comfort, safety, favourable conditions, correlation and regression analysis, statistical relationships, forecasting

**Acknowledgments.** The research was funded through the RF state program “Scientific and Technological Development of the Russian Federation for 2021–2022” within the framework of the Plan of Fundamental Scientific Research of the Ministry of Construction of the Russian Federation and RAACS for 2021.

**FOR CITATION:** Ilyichev V.A., Kolchunov V.I., Gordon V.A., Kormina A.A. Statistical relationships between indicators of favourable living environments in biosphere compatible cities. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(5):545-556. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.545-556 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одна из важнейших в строительной и градостроительной науке задача — формирование благоприятной, комфортной и безопасной среды жизнедеятельности города<sup>1</sup>. Решение этой задачи требует построения новых моделей и выявления закономерностей функционирования городских элементов планировочных структур, среди которых обеспечивающими качество городской среды, включая комфорт и безопасность, в первую очередь, служат жилые территориальные образования и их инфраструктура [1]. Жилые территориальные образования (районы, микрорайоны, кварталы) являются объектами градостроительной деятельности, которые, прежде всего, определяют способность городской среды удовлетворять жизненно необходимые потребности населения с учетом социально-экономических и демографических перспектив и всестороннего развития человека [2]. Среди жизненно необходимых потребностей городского населения следует отметить не только материальные потребности (качество питания, одежды, комфорт жилища, качество и доступность здравоохранения, образования, сферы обслуживания, окру-

жающей среды, досуга, социального общения и др.), но и возрастающие в последнее время духовные и культурные (познание и самопознание, потребность творческого труда, вероисповедание и др.). С этих позиций понятие «среда жизнедеятельности города» стоит рассматривать как динамично развивающуюся категорию [3].

В градостроительстве под *комфортностью пространственной среды* понимается такое ее объективное состояние и субъективное восприятие, которые соответствуют системе сложившихся в данное время, в данном месте и обществе потребностей, ценностей, этических норм и культурных традиций, формирующих представление о том, какие элементы и свойства пространственной среды необходимы для достойного существования человека [4].

Наиболее точное, отвечающее современным вызовам, определение комфортной и безопасной среды жизнедеятельности города сформулировано в рамках нового научного направления и парадигмы жизнедеятельности — биосферосовместимого города, разработанной в РААСН под руководством академика В.А. Ильичева. Биосферная совместимость города — это состояние симбиоза города и окружающей биосферы, при котором город и его жители позитивно развиваются, также, как и биосфера, сохраняют способность естественно развиваться в данном регионе [5]. С позиции биосферосовместимого города под *комфортной городской средой* по-

<sup>1</sup> О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации до 2024 года : Указ Президента Российской Федерации от 21.07.2020 № 474. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027>

нимаем такие условия среды жизнедеятельности, при которых достигается гармоничное развитие человека (физическое, материальное и духовное) в единстве с окружающей город природной средой с учетом общественных интересов всех категорий городского населения.

Работы академика РААСН В.А. Ильичева и его последователей сделали возможным понимание того, что среда жизнедеятельности городского населения является целостной многоуровневой системой элементов, взаимодействие которых носит процессный характер. Комплексная характеристика объективных и субъективных условий жизни определяет физическое, ментальное, социально-культурное развитие человека, группы или сообщества людей, а развитая инфраструктура города — это индикатор, выявляющий в значительной степени уровень благоприятности среды жизнедеятельности.

Впервые методология установления причинно-следственных связей между количеством населения региона и уровнями ряда факторов, определяющими условия для развития человека в биосферосовместимом городе, была предложена в исследовании «Методика прогнозирования показателей биосферосовместимости урбанизированных территорий» [6]. Процедура предложенного имитационного моделирования позволяет оценивать демографическую ситуацию, как основной показатель развития города, в зависимости от экологических факторов — уровня загрязнения атмосферного воздуха и водных ресурсов.

В научной работе «Технологии обеспечения экологически безопасной и доступной среды биосферосовместимого города для маломобильных групп населения» Е.В. Брума разработала математическую модель для анализа среды жизнедеятельности маломобильных групп населения (МГН) как наименее социально защищенной на сегодняшний день группы [7]. Исследователем установлены корреляционные связи между количеством инвалидов по различным категориям заболеваемости и рядом факторов эколого-социо-экономического характера, что позволило оценивать динамику и строить краткосрочные прогнозы развития численности МГН [8]. В дополнительных исследованиях с учетом экологических факторов построена модель динамики возрастной структуры населения урбанизированной территории и составлен прогноз роста численности нетрудоспособного населения [9].

Вопросы математического моделирования динамики и взаимовлияния численности населения и экологических факторов получили развитие и рассматриваются в труде [10]. Математические модели строятся на основе систем дифференциальных уравнений и отражают взаимодействия подсистем в виде численности населения, параметров загрязнения атмосферы и водоемов на урбанизированных территориях. Наряду с известными и ранее построенными

математическими моделями динамики численности населения, автором предложена альтернативная нелинейная модель, основанная на аналоге математической модели совместного существования двух видов В. Вольфтера и А. Лотки. Альтернативная модель приводит к устойчивому стационарному нулевому состоянию, неотрицательным непериодическим решениям при положительной начальной численности и может быть пригодна как для описания динамики населения, так и для управления демографической ситуацией на урбанизированных территориях.

Проблеме выявления функциональных зависимостей жизнедеятельности городского населения посвящены труды зарубежных исследователей. Например, Х. Бартон и М. Грант убеждены в том, что в значимые составляющие качества жизни в городах входят: образование, здравоохранение, культура, экология, и набор этих функций должен быть направлен на измерение устойчивого развития городов [11].

В ряде работ в области устойчивого функционирования природно-антропогенных систем [12, 13] установлены нелинейные зависимости ожидаемой продолжительности жизни населения от потребляемых природных ресурсов [14].

Вопросы устойчивости жилых районов с точки зрения их долгосрочной жизнеспособности обсуждаются в публикациях [15, 16] и представляют интерес для специалистов по территориальному планированию [17, 18].

Цель настоящего исследования — определение статистических закономерностей условий жизнедеятельности городского населения в зависимости от функционального обустройства жилых районов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретическую базу данной работы составляют парадигма и принципы жизнедеятельности биосферосовместимых городов и поселений, развивающих человека<sup>2</sup>:

- экологическая безопасность для всех и каждого;
- оценка фактического социального положения и направлений развития человека в городе;
- удовлетворение рациональных потребностей человека функциями градостроительных систем (функциями города).

Если условия жизнедеятельности в городе отвечают одновременно требованиям экологической безопасности и жизненно необходимым требованиям беспрепятственного доступа граждан к объектам инфраструктуры, надежности инженерного обеспечения и бесперебойного транспортного и коммунально-бытового обслуживания, благоустройства

<sup>2</sup> Ильичев В.А. Принципы преобразования города в биосферосовместимый и развивающий человека : научная монография. М. : Изд-во АСВ, 2015. 184 с.

территории, то город создал *благоприятную среду жизнедеятельности*.

### **Внедрение социальных стандартов в градостроительстве**

Благоприятные условия жизнедеятельности служат основой для гармоничных социальных взаимоотношений населения. При планировании развития города необходимо иметь информацию о происходящих социальных процессах, в таком случае можно планировать и создавать комфортные условия для жизни человека. Только материальная среда такой основы не даст. Объективные данные параметров закономерностей демографических и социальных процессов в соотношении с благоприятными условиями жизнедеятельности в жилых районах города позволяют получить сведения о комфорте проживания.

Благоприятная среда жизнедеятельности — это окружающая город среда, необходимая не только для выживания, но и роста человеческого потенциала, обеспечения *физического, духовного и социального благополучия* жителя в этом городе. Состояние благоприятной среды и удовлетворение потребностей человека с целью его развития достигается реализацией функций градостроительных систем или функций города. Если какие-либо потребности населения не удовлетворяются, то они проявляются негативно, неудовлетворение людей перерастет в конфликты, угрожающие общей безопасности. Поэтому первым шагом в создании комфортной среды жизнедеятельности является необходимость восстановления недостающей функции города.

Практическим инструментарием решения поставленной задачи — установления статистических закономерностей жизнедеятельности населения в зависимости от функционального обустройства жилых территориальных образований города и предоставления условий для развития человека — служат методы корреляционно-регрессионного анализа.

В рамках настоящего исследования была сформулирована гипотеза о том, что инфраструктура жилых районов (микрорайонов/кварталов), реализующая функции биосферосовместимого города, есть индикатор его благоприятной среды жизнедеятельности и уровня социального благополучия населения, живущего в этих районах (микрорайонах/кварталах).

### **Построение системы показателей**

Выбор факторов, влияющих на показатели благоприятной среды жизнедеятельности биосферосовместимого города, производится исходя из содержательного анализа экологических, экономических и демографических состояний и процессов с использованием статистических и математических критериев, а также нормативных требований градостроительного проектирования жилых райо-

нов (микрорайонов/кварталов). Однако определение таких показателей в жилых территориальных образованиях современных городов при всей кажущейся простоте содержит в себе ряд проблем, препятствующих адекватной оценке показателей. Например, основной особенностью оценки условий для развития населения в городе служит то, что процессы жизнедеятельности не поддаются во многом прямому измерению, а определенные элементы могут быть оценены только косвенно с известной степенью условности. Как показывает статистическая практика, наиболее реально оцениваемыми, хорошо прослеживаемыми являются социально-экономические и медико-демографические показатели [19].

Предлагаемая в данной работе система оценочных показателей — агрегированная, базирующаяся на совокупности составляющих и определенном перечне индикаторов. Она включает в себя следующие оценочные блоки:

1) *экологические факторы жилых районов (микрорайонов/кварталов)*, которые рассматривали в своих работах многие отечественные исследователи (В.Н. Азаров, В.Ф. Сидоренко, В.И. Теличенко, М.Ю. Слесарев, Ю.Н. Лапин, В.В. Алексашина, В.А. Гутников, А.С. Курбатова, А.Н. Тетиор, Н.А. Сапрыкина и др.). Экологический аспект регенерации городских территорий изучали: С.Б. Чистякова, Г.Ю. Чубин, Л.В. Акопов, С.В. Генералов, И.В. Черешнев, Э.Н. Бакланова, С.А. Ревякин, С.Е. Стеценко и др.;

2) *факторы пространственно-территориального обеспечения населения жилых районов (микрорайонов/кварталов)*. В совокупности этой группы показателей фундаментальным показателем является плотность населения, отражающая взаимоотношения человека, города и биосферы [20]. Большой вклад в разработку показателей оценки пространственно-территориального обеспечения населения жилых районов внесли ученые: В.В. Владимиров, М.В. Шубенков, Н.С. Краснощекова, Ю.В. Алексеев, Е.Н. Перцик, А.В. Крашенинников и др.;

3) *факторы структурно-планировочной организации жилых районов (микрорайонов/кварталов)*. Развитием методологической основы градостроительного проектирования жилых районов (микрорайонов/кварталов) и созданием комфортных условий проживания занимались исследователи: Е.А. Ахмедова, В.Н. Белоусов, С.Д. Митягин, А.В. Кузьмин, З.К. Петрова, Г.А. Птичникова, Ю.А. Сдобнов, И.М. Смоляр, О.Н. Яницкий и др.;

4) *реализуемость функций города на территории жилых районов (микрорайонов/кварталов)*. Этот оценочный блок предлагается ввести впервые. Он базируется на иерархии семи функций биосферосовместимого города. Оценка соответствия среды жилых территориальных образований функциям города заключается в сопоставлении нормативных

требований градостроительного проектирования с реализованными фактически: обеспеченностью социально-значимыми и жизненно необходимыми объектами и их доступностью населению. В процессе оценки соответствия проектной документации жилых районов нормативным требованиям, а также анализа данных статистической отчетности городов ЦФО определены показатели жизнедеятельности населения, которые приняты в работе в качестве объясняемых факторов. Так, базовой основой формирования благоприятных условий жизнедеятельности в городе является демографический компонент. В общем виде — это фактическая численность населения, проживающего в жилых районах (микрорайонах/кварталах) на текущий момент времени, и изменение численности в зависимости от условий жизнедеятельности. Исследование демографии жилого района города позволяет вести анализ в динамике, а также выполнять сравнительный анализ условий жизнедеятельности в различных районах города.

Социальная компонента видится нами в показателях девиантного поведения или его признаков населения жилых районов (микрорайонов/кварталов), поскольку связь между условиями жизни и асоциальными процессами является доказанной. Город и его инфраструктура реализуют, прежде всего, социальные функции и отражают уровень социально-экономического развития общества, а право на благоприятную среду жизнедеятельности имеет каждый гражданин нашей страны. Социальные процессы, протекающие на территории жилой застройки и в жилой среде, рассмотрены в трудах С.М. Лыжина, К.К. Карташовой, К.В. Кияненко, И.П. Прядко, З.И. Ивановой и др.

Таким образом, предлагаемая система показателей оценки базируется на уже известных показателях и новых, предлагаемых в настоящей работе. Следует заметить, что используемый перечень показателей не является полным и исчерпывающим, для чего необходимо провести дополнительные исследования, например социологический опрос. Естественным ограничением для уже апробированных и вновь предлагаемых показателей оценки выступает база исходных данных, формируемая проектной документацией жилых территориальных образований и Федеральной службой государственной статистики (Росстат).

На начальном этапе построения статистических зависимостей уточняем перечень показателей, которые могут быть включены в модель. Их число может быть значительным, однако, для получения надежных оценок в модель не следует включать более одной трети объема имеющихся данных. Для определения наиболее значимых факторов применяют коэффициенты парной и множественной корреляции.

Нами использовались данные обследования 17 жилых микрорайонов 15 различных городов России (Орел, Курск, Белгород, Рязань, Тверь, Брянск, Ли-

пецк, Москва, Калуга, Тюмень, Йошкар-Ола, Киров, Воронеж, Елец, Тула) с численностью населения от 2 до 50 тыс. человек.

В перечень зависимых (объясняемых) факторов среды жизнедеятельности микрорайонов включены два демографических показателя:  $Y_1$  «Количество родившихся за последний год» и  $Y_2$  «Количество умерших за последний год», и два социальных показателя:  $Y_3$  «Количество браков» и  $Y_4$  «Количество разводов», выявленных по данным Росстата ( $Y_1$ – $Y_4$ ).

В качестве независимых (объясняющих) факторов принято 50 показателей ( $X_1$ – $X_{50}$ ), характеризующих различные составляющие реализуемости функций города  $\Phi_i$  при условии, что значимость всех функций города одинаковая, а реализуемость их в жилых районах разная. В частности, как показал анализ реализуемости функций города, 7 факторов ( $X_1$ – $X_7$ ) относятся к жилищным условиям населения и 22 фактора ( $X_8$ – $X_{29}$ ) — к системам жизнеобеспечения жилых районов и отражают реализуемость функции города «Жизнеобеспечение»; 5 факторов ( $X_{30}$ – $X_{34}$ ) относятся к функции «Развлечения и отдых»; 3 фактора ( $X_{35}$ – $X_{37}$ ) — к системе управления, т.е. функции «Власть»; 4 фактора ( $X_{38}$ – $X_{41}$ ) — к образовательной функции «Знания»; 1 фактор ( $X_{42}$ ) — к функции города «Творчество»; 3 фактора ( $X_{43}$ – $X_{45}$ ) — к гармонизации отношений с окружающей средой, т.е. функции города «Связь с природой». Кроме того, принимались во внимание показатели экологической безопасности жилых территорий, обусловленные выбросами от подвижных и стационарных источников загрязнения атмосферного воздуха и обращением с ТКО ( $X_{46}$ – $X_{49}$ ). Фактором так называемого «механизма демографического воспроизводства» [21] является показатель «Численность населения» ( $X_{50}$ ).

Числовые значения указанных объясняемых  $Y_1$ – $Y_4$  и объясняющих  $X_1$ – $X_{50}$  факторов выбраны для каждого из 17 микрорайонов, т.е. число наборов данных  $n = 17$ .

Связь между зависимой переменной  $Y_i$  ( $i = 1 \dots 4$ ) и независимыми переменными  $X_j$  ( $j = 1 \dots 50$ ) принимается линейной в виде функции

$$Y_i = t_i(x_1, x_2, \dots, x_{50}).$$

Согласно рекомендациям для включения в модель для каждого  $Y_i$  необходимо выбрать  $m = 5$  ( $m \leq n/3 = 17/3 \approx 5$ ) из наиболее существенных факторов из  $X_j$ .

По существу, необходимо построить и оценить параметры функций вида:

$$Y_i = a_{0i} + a_{i1}x_{i1} + a_{i2}x_{i2} + \dots + a_{i5}x_{i5}, \quad (i = 1 \dots 4),$$

где  $a_{0i}$ ,  $a_{ij}$  ( $j = 1 \dots 5$ ) — подлежащие определению константы;  $x_{ik}$  — пять наиболее значимых для данного  $Y_i$  объясняющих факторов, полученных анализом значений коэффициентов парных корреляций  $r_{Y_i, X_k}$  ( $k = 1 \dots 50$ ).

Зависимость показывает, каково будет в среднем значение переменной  $Y_i$ , если переменные  $X_{ij}$  примут конкретные значения.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Определение наиболее значимых объясняющих факторов. Анализ матрицы коэффициентов парной корреляции**

На этом этапе рассчитываются коэффициенты парной и множественной корреляции: из них  $6 (r_{Y_iX_1}, r_{Y_iX_2}, \dots, r_{Y_iX_{50}}) = 300$  коэффициентов вида  $r_{Y_iX_k}$  ( $i = 1 \dots 4$  и  $k = 1 \dots 50$ ) и множество коэффициентов вида  $r_{X_iX_j}, \dots, r_{X_{49}X_{50}}$ .

Значения переменных  $Y$  и  $X$ , содержащихся в наблюдаемой совокупности факторов, записываем в матрицу коэффициентов парной корреляции между объясняющими факторами  $r_{X_i}$  для каждого  $Y_i$  ( $i = 1 \dots 4$ ) (табл.).

Далее в ходе оценки значимости факторов производится их сравнительная оценка и отсев части факторов путем анализа коэффициентов парных корреляций  $r_{Y_iX_k}$  и  $r_{Y_iX_m}$ .

Значения коэффициентов парной корреляции лежат в интервале от  $-1$  до  $+1$ . Их положительное значение свидетельствует о прямой связи (с расчетом одной переменной другая тоже увеличивается), отрицательное — об обратной (с ростом одной переменной другая уменьшается). Чем ближе значение коэффициента к  $1$ , тем теснее связь. Связь считается достаточно сильной, если коэффициент корреляции дает объективную оценку тесноты связи лишь при линейной зависимости переменных.

В модель включаем те факторы, связь которых с зависимой переменной наиболее сильная. Кроме того, одним из условий регрессионной модели является предположение о линейной независимости объясняющих переменных  $X_m$ . Близкая связь между двумя независимыми факторами называется колли-

неарностью. Явление коллинеарности в исходных данных считается установленным, если коэффициенты парной корреляции между двумя переменными более  $0,7$ . В этом случае необходимо избавиться от коллинеарности, так как будет происходить совокупное воздействие факторов друг на друга, и нельзя будет оценить влияние каждого фактора в отдельности. Чем сильнее мультиколлинеарность, тем менее надежна оценка, вытекающая из модели. В этом случае из модели исключают одни из сильно связанных между собой факторов и включают следующий по значимости фактор.

Для выявления факта коллинеарности анализируется матрица коэффициентов парной корреляции между объясняющими факторами  $r_{X_i}$  (см. табл.). В результате проделанных вычислений всех коэффициентов парной корреляции, отбора наиболее значимых для каждого  $Y_i$  объясняющих факторов, учета обнаруженных сильных связей между объясняющими и объясняемыми факторами, а также исключения коллинеарности получены модели для всех объясняемых факторов.

**Статистические зависимости физического благополучия населения биосферосовместимого города** были получены нами в форме уравнений множественной линейной регрессии для факторов  $Y_1$  «Количество родившихся за последний год» и  $Y_2$  «Количество умерших за последний год»:

$$Y_1 = a_{01} + a_{11}x_{50} + a_{21}x_{48} + a_{31}x_{24} + a_{41}x_{34} + a_{51}x_{33}; \quad (1)$$

$$Y_2 = a_{02} + a_{12}x_{50} + a_{22}x_{48} + a_{32}x_{30} + a_{42}x_{14} + a_{52}x_{12}. \quad (2)$$

Базируясь на результатах корреляционного анализа, установили, что на исследуемый показатель  $Y_1$  «Количество родившихся за последний год» влияет ряд объясняющих факторов жизнедеятельности человека в жилых микрорайонах, в частности:

- численность населения, тыс. чел. ( $x_{50}$ );

Общий вид матрицы коэффициентов парной корреляции

The standard form of the matrix of pair correlation coefficients

| Факторы<br>Factors | $Y_i$           | $X_1$           | $X_2$           | ... | $X_{49}$           | $X_{50}$ |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----|--------------------|----------|
| $Y_i$              | ...             | ...             | ...             | ... | ...                | ...      |
| $X_1$              | $r_{Y_iX_1}$    |                 |                 |     |                    |          |
| $X_2$              | $r_{Y_iX_2}$    |                 |                 |     |                    |          |
| ...                |                 |                 |                 |     |                    |          |
| $X_{49}$           | $r_{Y_iX_{49}}$ | $r_{Y_iX_{49}}$ | $r_{Y_iX_{49}}$ |     |                    |          |
| $X_{50}$           | $r_{Y_iX_{50}}$ | $r_{Y_iX_{50}}$ | $r_{Y_2X_{50}}$ |     | $r_{Y_{49}X_{50}}$ |          |

- выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, отходящих от подвижных источников, тыс. т ( $x_{48}$ );
- инженерная защищенность территории и уровень экологической безопасности (уровень защищенности помещений от накопления радона) ( $x_{24}$ );
- площадь территорий зон массового кратковременного отдыха, м ( $x_{34}$ );
- коэффициент плотности застройки ( $x_3$ ).

Как показал анализ уравнения (1), наибольшее влияние на количество рождающихся связано с выбросами от подвижных источников — автотранспортных средств ( $x_{48}$ ). Автомобили, как средства передвижения, получили наибольшее распространение в жилых районах, что отражается на состоянии атмосферного воздуха. Количество выбросов напрямую определяет степень воздействия на здоровье населения и его репродуктивную способность. К экологическим факторам относятся и ионизирующие излучения естественной и искусственной природы — фактор ( $x_{24}$ ).

Тем не менее вопрос динамики и причинно-следственных связей рождаемости остается дискуссионным ввиду его многофакторности. Эксперты нередко называют урбанизацию и связанное с ней качество жизни населения в числе показателей, снижающих рождаемость. Многочисленные исследования демографов показали, что рождаемость у горожан примерно в полтора раза ниже, чем в сельских районах [22, 23]. При этом ученые обращают внимание на динамику городского образа жизни, связанную со стрессами и отдыхом (факторы ( $x_{34}$ ) и ( $x_{30}$ )), которая приводит не только к снижению рождаемости, но и стимулированию смертности. Кроме того, еще задолго до возникновения статистики и демографии установлена обратная зависимость между уровнем доходов и рождаемостью. А. Смит еще в 1776 г. отметил обратную связь между числом рожденных детей и социальным положением матерей [24]. Во Франции в XX в. статистик Жак Бертильон изучал дифференциальную рождаемость, т.е. систематические различия в уровнях рождаемости между социальными группами. В 1980 г. он опубликовал результаты статистического исследования различий в уровнях рождаемости жителей четырех европейских столиц (Вена, Берлин, Париж, Лондон), показывающие обратную корреляционную зависимость между материальным уровнем жизни и уровнем рождаемости [25].

Смертность — демографический процесс, включающий всю совокупность смертей за определенный период времени. Уровень смертности определяет частоту (интенсивность) случаев смертей в группе населения в течение определенного периода времени (обычно года).

Уровень смертности зависит от сочетания факторов, среди которых выделяют две основные группы: эндогенные факторы, связанные с естественным старением организма, особенностями его физиоло-

гии, генетики, психики; экзогенные факторы, т.е. порожденные влиянием внешней среды — экономической и социальной, а также экологической обстановкой и уровнем развития гигиены и здравоохранения, личным образом жизни. В странах с низким уровнем развития велика роль экзогенного фактора, поэтому там большой уровень младенческой смертности. В странах с более высоким уровнем развития превалирует влияние эндогенных факторов, поэтому максимальная смертность перемещается в старшие возрастные группы [26].

Основной причиной низкой продолжительности жизни населения в Российской Федерации является высокая смертность граждан трудоспособного возраста. Из общего числа умерших почти треть составляют граждане трудоспособного возраста, около 80 % из них — мужчины. Смертность от заболеваний сердечно-сосудистой системы, составляющая 55 % смертности от всех причин, в России в 3–4 раза выше, чем в европейских странах. Среди причин смерти в трудоспособном возрасте значительную долю (более 30 %) составляют внешние причины — случайные отравления, самоубийства, убийства, транспортные происшествия, прочие несчастные случаи [27].

Показатель младенческой смертности, рассчитанный по действующей в РФ системе, несмотря на его снижение с 18 на 1000 родившихся живыми в 1992 г. до 10,2 в 2006 г., примерно в 2 раза выше, чем в развитых европейских странах, Канаде и США (по расчетам в соответствии с рекомендациями Всемирной организации здравоохранения) [28]. В основе смертности населения лежат показатели: плотность населения, демографическая нагрузка, выход на пенсию и усиленное давление на трудоспособное население и др.

С помощью построенной нами регрессионной модели (2) было установлено, что на исследуемый показатель  $Y_2$  «Количество умерших за последний год» влияют следующие объясняющие факторы:

- численность населения, тыс. чел. ( $x_{50}$ );
- выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, отходящих от подвижных источников, тыс. т ( $x_{48}$ );
- обеспеченность объектами учреждений, организаций и предприятий обслуживания (кафе, рестораны, бары) ( $x_{30}$ );
- индекс доступности жилья (рыночная стоимость жилья, руб./м<sup>2</sup>) ( $x_{14}$ );
- доступность объектов инфраструктуры первичного/повседневного обслуживания (медицинские организации) ( $x_{12}$ ).

Кроме выявленных факторов, общеизвестно, что уровень смертности обусловлен также высоким уровнем заболеваемости населения, распространением алкоголизма, наркомании, табакокурения. Зачастую в жилых районах не созданы условия, побуждающие людей бережно относиться к соб-

ственному здоровью и здоровью своих детей. Недостаточно развиты формы досуга, способствующие ведению здорового образа жизни (физическая культура, спорт, туризм, активный отдых и др.). Даже если не углубляться в тонкости демографии, понятно, что этот тезис выглядит обоснованным, и можно сказать, что проблемы качества жизни в современных жилых районах находятся в прямой связи с проблемами социально-демографическими<sup>3</sup>. Таким образом, это указывает на прямую связь между жизнеобеспечивающими факторами и уровнем рождаемости и смертности, что нельзя не учитывать при прогнозировании показателей комфортности среды жизнедеятельности в целом. В связи с этим в качестве второй группы объясняемых показателей нами были выбраны показатели заболеваемости населения жилых районов, приобретенные как следствие сложившегося типа жизнедеятельности.

#### Статистические зависимости социального благополучия жизни населения биосферосовместимого города

С каждым годом увеличивается объем построенного жилья, увеличивается плотность жилой многоэтажной застройки, растет этажность жилых домов. Увеличенная плотность застройки значительно влияет на общий социальный климат и поведение жителей жилых районов (микрорайонов/ кварталов). В группе факторов социального благополучия — брачность, это — социально-демографический процесс образования брачных пар в населении. Брачность обуславливается и регулируется социально-культурными нормами, имеет юридические, социальные, экономические и другие аспекты. Демографическое значение брачности — в ее тесной связи с естественным воспроизводством населения. Брачность выступает как важнейший фактор рождаемости.

С каждым годом количество незарегистрированных браков в России становится больше [29]. Современные пары не видят смысла в официальном оформлении своих отношений. Основными причинами являются нежелание партнеров брать на себя обязательства, которые обычно сопровождают создание семьи; невозможность заключить официальный брак по состоянию здоровья или ограничению свободы [30].

Главным мотивом заключения брака служит удовлетворение потребности в эмоциональной привязанности, в продлении своего рода, организации

быта, досуга, моральной поддержке. Брак стабилизирует удовлетворение жизненных потребностей, поэтому в качестве одного из показателей среды жизнедеятельности биосферосовместимого города рассмотрим «Количество браков».

В соответствии с построенной регрессионной моделью (3) установлено, что на исследуемый показатель

$$Y_3 = a_{03} + a_{13}x_{50} + a_{23}x_{30} + a_{33}x_{14} + a_{43}x_{38} + a_{53}x_3 \quad (3)$$

влияют:

- численность населения, тыс. чел. ( $x_{50}$ );
- обеспеченность объектами учреждений, организаций и предприятий обслуживания (кафе, рестораны, бары), мест на 1000 чел. ( $x_{30}$ );
- индекс доступности жилья (рыночная стоимость жилья, руб./м<sup>2</sup>) ( $x_{14}$ );
- обеспеченность дошкольными образовательными учреждениями ( $x_{38}$ );
- коэффициент плотности застройки ( $x_3$ ).

Очевидно, что молодые люди стремятся создавать семьи в комфортных условиях проживания. Современные экологически чистые микрорайоны с развитой транспортной и инженерной инфраструктурой, с доступными объектами первичного и повседневного обслуживания, объектами дошкольного образования и общеобразовательными школами привлекают молодое поколение для проживания и создания семей.

Увеличение плотности застройки приводит к увеличению плотности населения. Любому человеку свойственно сопоставлять себя с окружающими, и чем люди ближе живут друг к другу, тем идентичнее их образ жизни. Это также может оказывать положительный настрой на создание и сохранение семей [31].

Разводимость — процесс распада супружеских пар вследствие расторжения брака (развода). В последнее время в России ежегодно расторгается примерно 800 тыс. браков, в результате около 400 тыс. несовершеннолетних детей остаются в неполной семье. Фактически, разводами в течение первых лет после регистрации заканчивается большинство браков. И несмотря на то, что в России заключенных браков все же больше, чем расторгнутых, разница между этими показателями каждый год снижается. Распад семей, как известно, ведет к снижению рождаемости [32].

Данные специальных социологических исследований показывают, что имеет место не только увеличение толерантности общества по отношению к разводу, но и меняется структура причин и мотивов, по которым развод считается не только допустимым, но даже приемлемым и чуть ли не обязательным.

В соответствии с построенной регрессионной моделью (4) установлено, что на исследуемый показатель  $Y_4$  «Количество разводов за последний год»

$$Y_4 = a_{04} + a_{14}x_{48} + a_{24}x_{14} + a_{34}x_{30} + a_{44}x_{38} + a_{54}x_{15} \quad (4)$$

<sup>3</sup> Доклад директора Фонда независимого мониторинга медицинских услуг и охраны здоровья человека «Здоровье», члена центрального штаба ОНФ Эдуарда Гаврилова в рамках подготовки к Форуму ОНФ по здравоохранению, 31.07.2018. URL: <https://onf.ru/2018/07/31/gavrilov-rost-vnutribolnichnoy-smertnosti-svyazan-v-tom-chisle-i-sosnizheniem/>

вливают следующие объясняющие факторы:

- выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, отходящих от подвижных источников, тыс. т ( $x_{48}$ );
- индекс доступности жилья (отношение рыночной стоимости жилья к доходам населения) ( $x_{14}$ );
- обеспеченность объектами учреждений, организаций и предприятий обслуживания (кафе, рестораны, бары), мест на 1000 чел. ( $x_{30}$ );
- обеспеченность дошкольными образовательными учреждениями ( $x_{38}$ );
- уровень благоустроенных дворовых территорий от общего их количества ( $x_{15}$ ).

Инфраструктурные факторы в целом влияют на психоэмоциональное состояние населения. При недостаточно полном удовлетворении потребностей населения в качественной инфраструктуре жилого района со временем у жителей отмечается значимое повышение психологического дистресса, а именно повышение уровня тревоги, раздражительности, диссомнические нарушения, аффективные расстройства. Это в конечном итоге воздействует на атмосферу и внутренний климат в семье, приводит к ссорам, скандалам между супругами, что может привести к разводу.

Последствия увеличения показателей разводности [33]:

- существенно снижается уровень рождаемости;
- увеличение числа разводов, вызванное экономической несостоятельностью, психологическими и социальными причинами, ведет к ухудшению общего здоровья нации;
- нарушение соотношения полов ведет к развитию девиантного поведения в обществе: алкоголизму и наркомании;
- увеличение экономической и моральной состоятельности женщин в обществе приводит к «отмиранию» института брака и увеличению числа неполных семей.

Наличие уравнений (1) и (2) позволяет вычислить прирост населения жилых территориальных образований, а уравнений (3) и (4) охарактеризовать

процессы эволюции семей населения по данным бракоразводных процессов. Варьируя различными сочетаниями исходных параметров, можно выявить тенденции развития демографической ситуации в жилом районе (микрорайоне/квартале), а также спрогнозировать другие жизненно важные показатели биосферосовместимого города на краткосрочную и долгосрочную перспективы при исследуемых факторах среды жизнедеятельности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе анализа статистического материала и результатов обследования 15 городов Российской Федерации впервые установлены закономерности факторов жизнедеятельности городского населения в зависимости от функционального обустройства жилых территориальных образований (районов, микрорайонов, кварталов). Выявленная значимость статистических показателей благополучия населения жилых районов обусловлена тем, что в соответствии с одним из принципов парадигмы биосферной совместимости они отражают влияние многочисленных условий среды на показатели жизнедеятельности, а также характеризуют уровень удовлетворения физических, духовных и социальных потребностей городского населения. В аспекте комфортных и безопасных жилых районов, микрорайонов и кварталов современных городов функции биосферосовместимого города — это ответ на «потребности человека» средствами градостроительного планирования и проектирования.

В практическом плане результаты проведенного исследования дают возможность оценить функции биосферосовместимого города численно и на основе выполненных численных оценок сравнивать между собой разные планировочные и проектные решения, сопоставлять методы улучшения структуры города по одному показателю — степени удовлетворения потребностей человека. Разработанные модели могут служить инструментом поддержки принятия управленческих решений по обеспечению высокого уровня качества жизни населения урбанизированной территории.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крашенинников А.В. Видимый спектр градостроительных проблем // Градостроительное искусство: Новые материалы и исследования. Вып. 1. М.: КомКнига, 2007. С. 461–463.
2. Колясников В.А. Градостроительство в стратегических направлениях развития России // Архитектон: известия вузов. 2018. № 4 (64). С. 18.
3. Боков А.В. Теория. Город. Среда // Архитектура и строительство России. 2019. № 4 (232). С. 8–15.
4. Кузьмин А.В., Юсин Г.С. Качество жизни и качество пространственной среды — социальные стандарты и нормативы в градостроительстве, архитектуре, строительстве // Градостроительство. 2011. № 4 (14). С. 16.
5. Ильичев В.А., Колчунов В.И., Бакаева Н.В. Реконструкция урбанизированных территорий на принципах симбиоза градостроительных систем и их природного окружения // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 3. С. 4–11.

6. Ильичев В.А., Колчунов В.И., Гордон В.А. Методика прогнозирования показателей биосферосовместимости урбанизированных территорий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2010. № 2. С. 52–57.

7. Колчунов В.И., Брума Е.В. К оценке составляющей «Здравоохранение» при реализации функций города для маломобильных групп населения // Строительство и реконструкция. 2013. № 2 (46). С. 94–98.

8. Гордон В.А., Брума Е.В. Методика оценки биосферной совместимости урбанизированных территорий // Журнал экологии и промышленной безопасности. 2014. № 1–2. С. 61–64.

9. Gordon V.A. Mathematical model of dynamics regional population age structure // 4th SGEM International Multidisciplinary Scientific Conferences on SOCIAL SCIENCES and ARTS Proceedings 4th, Science and Humanities. 2017. DOI: 10.5593/sgemsocial2017/41/s18.050

10. Востров В.К., Третьяков В.В. Математические модели динамики численности населения и влияния на нее экологических факторов на урбанизированных территориях // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 10. С. 52–58.

11. Barton H., Grant M. Urban planning for healthy cities // Journal of Urban Health. 2011. Vol. 90. No. S1. Pp. 129–141. DOI: 10.1007/s11524-011-9649-3

12. Bouton S., Lindsay M., Woetzel J. New models for sustainable growth in emerging-market cities // Sustainable Cities. 2012. Pp. 54–63.

13. Rodrigues M., Franco M. Measuring the urban sustainable development in cities through a composite index: the case of Portugal // Sustainable Development. 2020. Vol. 28. No. 4. Pp. 507–520. DOI: 10.1002/sd.2005

14. Madreimov T., Li L. Natural-resource dependence and life expectancy: A nonlinear relationship // Sustainable Development. 2019. Vol. 27. No. 4. Pp. 681–691. DOI: 10.1002/sd.1932

15. Arendt R. Residential neighborhood design principles // Envisioning Better Communities. 2017. Pp. 53–98. DOI: 10.4324/9781351179720-4

16. Leonard T. Housing upkeep and public good provision in residential neighborhoods // Housing Policy Debate. 2016. Vol. 26. No. 6. Pp. 888–908. DOI: 10.1080/10511482.2015.1137966

17. Schropfer T. Ecological urban architecture. Birkhauser, 2012. 207 p. DOI: 10.1515/9783034611756

18. Patricios N.N. Urban design principles of the original neighbourhood concepts // Urban Morphology. 2002. Vol. 6 (1). Pp. 21–3219.

19. Кулькова И.А. Взаимосвязь статистических показателей качества жизни естественного воспроиз-

водства населения муниципальных образований // Известия УрГЭУ. 2016. № 3 (65). С. 92–99.

20. Алексеев Ю.В., Ануфриев А.А. Подход к оценке объемно-пространственных параметров жилой застройки при массовой реновации // Градостроительство. 2018. № 1 (53). С. 51–55.

21. Елин А.М., Пашин Н.П. Проблемы демографии и пути их решения в современной России // Вестник науки и образования. 2019. № 17 (71). С. 19–28.

22. Vladev I., Vladeva R. The demographic problem — one of the main problems of contemporary // Acta Scientifica Naturalis. 2020. Vol. 7. No. 2. Pp. 158–171. DOI: 10.2478/asn-2020-0027

23. Vandebroucke G. Russia's Demographic Problems Started Before // Economic Synopses. 2016. No. 4. DOI: 10.20955/es.2016.4

24. Мамонтов В.Д. Адам Смит и современность // Социально-экономические явления и процессы. 2006.

25. Jacques V. New analysis of French crime // New York Times. 1913.

26. Звездина Н.В., Иванова Л.В. Статистический анализ смертности в России // Экономика, статистика и информатика. 2012. № 2. С. 125–131.

27. Сабгайда Т.П., Иванова А.Е., Землянова Е.В. Преждевременная смертность и факторы риска как индикаторы программ снижения смертности в России // Социальные аспекты здоровья населения. 2017. № 3 (55). С. 1–25. DOI: 10.21045/2071-5021-2017-55-3-1

28. Низамова Э.Р., Цыбульская И.С. Влияние социальных и экономических факторов на младенческую смертность в Российской Федерации // Развитие российского здравоохранения на современном этапе : сб. науч. тр. Всеросс. мед. науч.-практ. конф. Мурманск, 2013. С. 72–81.

29. Устинова О.В., Пилипенко Л.М. Брачность в России: тенденции и перспективы // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 1595.

30. Гольшиева Е.В. Брак: понятие, концепции. Проблемы определения цели брака // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2009. Т. 9. № 4. С. 143–147.

31. Новоселова Е.Н. Современные тенденции брачности и разводимости в Москве // Социология. 2016. № 1. С. 38–46.

32. Хачатрян Л.А. Развод — оборотная сторона брака // Вестник Пермского университета. Философия. Психология. Социология. 2010. № 1 (1). С. 79–98.

33. Абушева Х.К., Шамилев С.Р. Браки и разводы в РФ и пути снижения последних // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. С. 237–246.

Поступила в редакцию 18 февраля 2021 г.

Принята в доработанном виде 11 мая 2021 г.

Одобрена для публикации 11 мая 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Вячеслав Александрович Ильичев** — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Перспективные и приоритетные направления в строительной науке», академик РААСН; **Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)**; 127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21; профессор кафедры проектирование зданий; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 65393, ORCID: 0000-0002-8383-8479; ilyichev@bk.ru;

**Виталий Иванович Колчунов** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой уникальных зданий и сооружений, академик РААСН; **Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ)**; 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94; профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 143969, Scopus: 55534147800, ResearcherID: J-9152-2013, ORCID: 0000-0001-5290-3429; asiorel@mail.ru;

**Владимир Александрович Гордон** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической физики и математики; **Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева)**; 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95; РИНЦ ID: 114961, Scopus: 7007009812, ResearcherID: P-5589-2015, ORCID: 0000-0001-7505-9734; gordon@ostu.ru;

**Александра Алексеевна Кормина** — аспирант; **Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ)**; 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94; РИНЦ ID: 11086079, ResearcherID: Abf-4677-2020, ORCID: 0000-0003-3448-5539; a\_kormina92@mail.ru.

## REFERENCES

1. Krashennnikov A.V. Visible spectrum of urban planning problems. *Urban planning art: New materials and research*. Issue 1. Moscow, KomKniga, 2007; 461-463. (rus.).
2. Kolyasnikov V.A. City planning in Russia's strategy. *Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2018; 4(64):18. (rus.).
3. Bokov A.V. Theory. City. Environment. *Architecture and Construction of Russia*. 2019; 4(232):8-15. (rus.).
4. Kuzmin A.V., Yusin G.S. Quality of life and quality of spatial environment — social standards and codes in urban planning, architecture and construction. *Urban Planning*. 2011; 4(14):16. (rus.).
5. Ilyichev V.A., Kolchunov V.I., Bakaeva N.V. Re-development of urban areas on the principles of the symbiosis of urban planning systems and their natural environment. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 3:4-11. (rus.).
6. Ilyichev V.A., Kolchunov V.I., Gordon V.A. Technique of predicting biosphere compatibility indices for urbanized territories. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2010; 2:52-57. (rus.).
7. Kolchunov V.I., Bruma E.V. By estimates of component "Healthcare" at realization of functions of the city for people with limited mobility. *Construction and Reconstruction*. 2013; 2:94-98. (rus.).
8. Gordon V.A., Broome E.V. Methodology for assessing the biosphere compatibility of urbanized territories. *Journal of Ecology and Industrial Safety*. 2014; 1-2:61-64. (rus.).
9. Gordon V.A. Mathematical model of dynamics regional population age structure. *4th SGEM International Multidisciplinary Scientific Conferences on SOCIAL SCIENCES and ARTS Proceedings 4th, Science and Humanities*. 2017. DOI: 10.5593/sgem-social2017/41/s18.050
10. Vostrov V.K., Tretyakov V.V. Mathematical models of population dynamics and impact of environmental factors on the population in urban areas. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 10:52-58. (rus.).
11. Barton H., Grant M. Urban planning for healthy cities. *Journal of Urban Health*. 2011; 90(S1):129-141. DOI: 10.1007/s11524-011-9649-3
12. Bouton S., Lindsay M., Woetzel J. New models for sustainable growth in emerging-market cities. *Sustainable Cities*. 2012; 54-63.
13. Rodrigues M., Franco M. Measuring the urban sustainable development in cities through a composite index: the case of Portugal. *Sustainable Development*. 2020; 28(4):507-520. DOI: 10.1002/sd.2005
14. Madreimov T., Li L. Natural-resource dependence and life expectancy: A nonlinear relationship. *Sustainable Development*. 2019; 27(4):681-691. DOI: 10.1002/sd.1932
15. Arendt R. Residential neighborhood design principles. *Envisioning Better Communities*. 2017; 53-98. DOI: 10.4324/9781351179720-4
16. Leonard T. Housing upkeep and public good provision in residential neighborhoods. *Housing Policy Debate*. 2016; 26(6):888-908. DOI: 10.1080/10511482.2015.1137966

17. Schropfer T. *Ecological Urban Architecture*. Birkhauser, 2012; 207. DOI: 10.1515/9783034611756.
18. Patricios N.N. Urban design principles of the original neighbourhood concepts. *Urban Morphology*. 2002; 6(1)21-32.
19. Kulkova I.A. Relationship of statistical indicators of the quality of life of the natural reproduction of the population of municipalities. *News. USUE*. 2016; 3(65):92-99. (rus.).
20. Alekseev Yu.V., Anufriev A.A. Approach to the assessment of the spatial parameters of the residential buildings at a mass renovation. *Urban Planning*. 2018; 1(53):51-55. (rus.).
21. Elin A.M., Pashin N.P. Problems of demography and their solutions in modern Russia. *Bulletin of Science and Education*. 2019; 17(71):19-29. (rus.).
22. Vladev I., Vladeva R. The demographic problem — one of the main problems of contemporary. *Acta Scientifica Naturalis*. 2020; 7(2):158-171. DOI: 10.2478/asn-2020-0027
23. Vandenbroucke G. Russia's demographic problems started before. *Economic Synopses*. 2016; 4. DOI: 10.20955/es.2016.4
24. Mamontov V.D. Adam Smith and modernity. *Socio-economic phenomena and processes*. 2016. (rus.).
25. Jacques B. New analysis of French crime. *New York Times*. 1913.
26. Zvezdina N.V., Ivanova L.V. Statistical analysis of mortality in Russia. *Economics, Statistics and Computer Science*. 2012; 2:125-131. (rus.).
27. Sabgaida T.P., Ivanova A.E., Zemlyanova E.V. Premature mortality and risk factors as indicators of mortality reduction programs in Russia. *Social Aspects of Public Health*. 2017; 3(55):1-25. DOI: 10.21045/2071-5021-2017-55-3-1 (rus.).
28. Nizamova E.R., Tsybul'skaya I.S. The influence of social and economic factors on infant mortality in the Russian Federation. *Development of Russian healthcare at the present stage: collection of scientific papers of the All-Russian medical scientific and practical conference*. Murmansk, 2013; 72-81. (rus.).
29. Ustinova O.V., Pilipenko L.M. Marriage in Russia: trends and prospects. *Modern Problems of Science and Education*. 2014; 6:1595. (rus.).
30. Golysheva E.V. Marriage: concept, concepts. Problems of determining the purpose of marriage. *Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University*. 2009; 9(4):143-147. (rus.).
31. Novoselova E.N. Modern trends of marriage and divorce in Moscow. *Sociology*. 2016; 1:38-47. (rus.).
32. Khachatryan L.A. Divorce — the flip side of marriage. *Bulletin of the Perm University. Philosophy. Psychology. Sociology*. 2010; 1(1):79-98. (rus.).
33. Abusheva Kh.K., Shamilev S.R. Marriages and divorces in the Russian Federation and ways of reducing the last. *Modern Problems of Science and Education*. 2013; 4:237-246. (rus.).

Received February 18, 2021.

Adopted in revised form on May 11, 2021.

Approved for publication on May 11, 2021.

**BIONOTES: Vyacheclav A. Ilyichev** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Perspective and Priority Areas in Construction Science, Academician of RAASN; **Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAACS)**; 21 Locomotive passage, Moscow, 127238, Russian Federation; Professor of the Department of Building Design; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 65393, ORCID: 0000-0002-8383-8479; ilyichev@bk.ru;

**Vitaly I. Kolchunov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the department unique buildings and structures, Academician of RAASN; **Southwest State University (SWSU)**; 94, 50 let Oktyabrya st., Kursk, 305040; Russian Federation; Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 143969, Scopus: 55534147800, ResearcherID: J-9152-2013, ORCID: 0000-0001-5290-3429; asiorel@mail.ru;

**Vladimir A. Gordon** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Physics and Mathematics; **Orel State University named after I.S. Turgenev**; 95 Komsomolskaya st., Orel, 302026, Russian Federation; ID RISC: 114961, Scopus: 7007009812, ResearcherID: P-5589-2015, ORCID: 0000-0001-7505-9734; gordon@ostu.ru;

**Alexandra A. Kormina** — postgraduate; **Southwest State University (SWSU)**; 94, 50 let Oktyabrya st., Kursk, 305040; Russian Federation; ID RISC: 11086079, ResearcherID: Abf-4677-2020, ORCID: 0000-0003-3448-5539; a\_kormina92@mail.ru.

## Технологии виртуальной реальности для визуализации задач моделирования параметров микроклимата застройки

В.Д. Оленьков, А.Д. Бирюков, А.О. Колмогорова

Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ)); г. Челябинск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Методы вычислительной гидродинамики (CFD) широко применяются в архитектурно-строительной отрасли для изучения микроклимата города или моделирования ветрового режима застройки. Оценка локальных параметров воздушного потока в масштабе отдельного человека с помощью технологий виртуальной реальности (VR) может значительно повысить информативность моделирования микроклимата. Процесс моделирования и постобработки задач гидродинамического моделирования в классических CAE (computer-aided engineering) пакетах сложен для непрофессиональных исследователей и не обеспечивает гибкого механизма совместного взаимодействия специалистов в условиях удаленной работы. Решением этих проблем может стать создание внешнего универсального постпроцессора, поддерживающего современные технологии виртуальной реальности и сетевого взаимодействия.

**Материалы и методы.** В качестве тестовых данных применена модель обтекания воздушным потоком группы зданий с последующим экспортом результатов во внешний визуализатор. Решение построено на базе среды Unity3D, в качестве источника данных использован пакет ANSYS Fluent.

**Результаты.** Описана общая архитектура и детали реализации прототипа PLT-Sim, включающего базовые инструменты интерактивной визуализации векторных данных воздушного потока в режиме виртуальной реальности, а также систему импорта результатов из разных систем моделирования. Применение стереоскопического представления картины скоростей воздушного потока позволило реализовать новые механики взаимодействия с компьютерными моделями с точки зрения пешеходов.

**Выводы.** Новые методы VR-визуализации экспериментов в реальном времени дают возможность точнее обосновывать результаты научной деятельности. Приведенное решение позволит прогнозировать и выявлять ошибки проектирования, а также облегчить удаленную совместную работу исследователей над научными задачами в условиях пандемии. Рассмотренное программно-техническое решение является одним из первых прототипов, реализующих подход к визуализации информации о микроклимате и ветровом комфорте в масштабе отдельного пешехода.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** градостроительство, город, ветер, климат, CFD-моделирование, постпроцессинг, виртуальная реальность, Unity3D

*Благодарности:* Данная работа выполнена в рамках НИР по результатам победы в конкурсе «УМНИК – Цифровая Россия» 2019.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Оленьков В.Д., Бирюков А.Д., Колмогорова А.О. Технологии виртуальной реальности для визуализации задач моделирования параметров микроклимата застройки // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 5. С. 557–569. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.557-569

## Using virtual reality technologies to visualize parameters of urban microclimate

Valentin D. Olenkov, Aleksandr D. Biryukov, Alena O. Kolmogorova

South Ural State University (National research university) (SUSU (National Research University)); Chelyabinsk, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Methods of computational fluid dynamics (CFD) are widely used in architecture and civil engineering to study the microclimate of a city or simulate the wind regime of a building. Using virtual reality (VR) technologies to assess local airflow parameters in respect of an individual can significantly increase the informativity of the microclimate simulation. The process of simulation and post-processing of hydrodynamic simulation problems in classical CAE (computer-aided engineering) packages is difficult for non-professional researchers and does not provide a flexible interaction mechanism for specialists in the remote work environment. The solution is to develop an external universal post-processor supporting modern technologies of virtual reality and network interaction.

**Materials and methods.** A model of an airflow around a group of buildings was used as the test data, and the results were exported to an external visualizer. The solution employs the Unity3D engine, and the Ansys Fluent package is used as the data source.

**Results.** The paper describes the general architecture and implementation details of the PLT-Sim prototype, which includes

basic tools for interactive visualization of vector airflow data in the virtual reality mode, as well as the system designated for importing results from different modeling systems. The stereoscopic representation of the image of airflow velocities makes it possible to implement new mechanics of interaction with computer models from the point of view of pedestrians.

**Conclusions.** Using new methods of VR visualization of experiments in the real time makes it possible to more accurately substantiate the results of research activities. The proposed solution will allow to predict and detect design errors, as well as facilitate remote collaboration between researchers focused on research tasks in the context of a pandemic. This software and hardware solution is one of the first prototypes that implements an approach to visualizing microclimate and wind comfort data as viewed by an individual pedestrian.

**KEYWORDS:** urban planning, city, wind, climate, CFD modeling, postprocessing, virtual reality, Unity3D

*Acknowledgements.* This work is performed within the framework of a research undertaking which is the winner of the "Digital Russia" UMNİK 2019 contest.

**FOR CITATION:** Olenkov V.D., Biryukov A.D., Kolmogorova A.O. Using virtual reality technologies to visualize parameters of urban microclimate. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(5):557-569. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.557-569 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

В современных инженерных изысканиях наиболее часто применяются компьютерные или вычислительные методы для расчетов, анализа или симуляции физических процессов. Данные методы и программные решения на их основе объединены общим понятием — САЕ (computer-aided engineering) и включают в себя несколько направлений. Относительно новым разделом компьютерного инженерного анализа является вычислительная гидродинамика или CFD-моделирование (Computational Fluid Dynamics). Эти методы ранее, как правило, использовались для аэродинамических экспериментов в области машиностроения и авиации. Тем не менее в ходе развития направления CFD методы стали применять и в архитектурно-строительных областях, в частности, для решения задач обтекания воздушным потоком уникальных зданий и сооружений, а также для расчета ветровых нагрузок на здания [1, 2]. В настоящее время такие методы находят применение в рамках градостроительной климатологии, для решения задач по моделированию микроклиматических параметров территорий (влажность, скорость, давление, температура) с целью экспериментальной оценки биоклиматической комфортности и ветровых режимов проектируемой застройки [3, 4]. Также с помощью CFD-методов возможно решение задач тепломассопереноса, для моделирования распространения выхлопных газов и вредных выбросов, а также для оценки эффективности мер по снижению температуры воздуха в условиях жаркого климата и плотной застройки. В качестве примера использования CFD-моделирования в рамках задач оптимизации городского микроклимата также можно привести исследование по улучшению теплового комфорта на улицах Роттердама с помощью систем распыления [5]. Согласно полученным в ходе CFD-моделирования результатам, видно, что система распыления воды во внутреннем дворе позволяет снизить температуру воздуха более чем на 6 °С. CFD-модели позволяют заранее оценить и спрогнозировать результаты применения

распылителей и оптимизировать их расположение и количество распыляемой воды. Аналогичным примером может выступать ряд исследований по моделированию и оценке влияния озеленения в виде парка на локальный микроклимат и ветровой режим в окрестностях [6]. Важность мер по адаптации городов к изменению климата — актуальный вопрос для ближайшего будущего. Используемые для решения такого рода задач CFD-модели должны включать моделирование ветрового режима, солнечного излучения, процессов теплопередачи и испарительного охлаждения.

Существует широкий перечень программных решений и платформ, применяемых для CFD-моделирования, большинство из них базируются на конечно-элементных или конечно-объемных методах численного моделирования [7]. Чаще всего данные решения функционально ориентированы на профессиональных пользователей, хорошо знакомых с встроенным инструментарием, и обладают высоким порогом вхождения для исследователей, имеющих базовые знания САЕ-пакетов, а встроенные средства постобработки и визуализации результатов являются достаточно глубоко интегрированными с каждым отдельным пакетом моделирования, что замедляет интерпретацию и обмен информацией между исследователями. Кроме того, зачастую конечные исследователи или пользователи прибегают к услугам профессионалов в области моделирования и взаимодействуют лишь с готовыми файлами-результатами, в таком случае постобработка или самостоятельное внесение изменений в графические материалы становятся затруднительными.

Создание дружественных к пользователю средств интерактивного постпроцессинга на основе более привычных широкой аудитории механик взаимодействия может значительно упростить процесс постобработки и визуализации научных данных. В рамках реализации новых принципов взаимодействия с САЕ-системами в настоящее время активно внедряются технологии иммерсионной виртуальной реальности (VR) на основе со-

временных VR-гарнитур [8, 9]. Применение таких технологий позволяет взаимодействовать с трехмерным представлением сведений путем погружения в виртуальную среду с возможностью перемещения и взаимодействия с виртуальным окружением более естественным и интуитивным методом. Интеграция этих методов с современными сетевыми возможностями программного обеспечения позволит реализовать достаточно эффективную систему удаленной виртуальной коллаборации [10].

Таким образом, в условиях современных вызовов существует потребность в исследовании применения VR-технологий для постобработки результатов CFD-моделирования с возможностью сетевой удаленной коллаборации. С целью оценки применения данных методов и проверки гипотезы о возможности создания независимой от пакета моделирования среды постобработки необходимо создание программного прототипа системы, реализующей базовые потребности и механики в объеме, достаточном для практического применения.

Цель исследования — разработка функционального прототипа программного решения PLT-SimVR, нацеленного на совершенствование методов визуализации результатов гидродинамического моделирования с возможностью сетевого взаимодействия. Результат работ на этом этапе должен включать в себя описание архитектуры и реализации функционального прототипа комплекса. В качестве среды для реализации прототипа программного продукта была выбрана программная платформа Unity3D, которая позволяет быстро создавать трехмерные приложения с поддержкой VR и хорошо подходит для научной визуализации [11]. В качестве аппаратной платформы для реализации VR взаимодействия была использована гарнитура Oculus Quest 2, ввиду своей широкой доступности и распространенности, а также богатых инструментов разработки и документации.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Анализ аналогов и описание архитектуры комплекса

С целью уточнения функциональных возможностей VR-постпроцессора необходимо провести анализ типовых решений в этой области и определить стандартные подходы и инструменты, используемые в классических существующих системах постпроцессинга. В качестве таких комплексов можно рассмотреть два решения: ANSYS CFD-Post и ParaView. Эти продукты являются наиболее часто упоминаемыми постпроцессорами для CFD-моделирования [12, 13]. В исследовании больший акцент был сделан на функционал и механику работы системы CFD-Post, так как эта система служит встроенным инструментом постпроцессинга для программного пакета ANSYS Fluent, с помощью которого осуществляется большое количество

прикладных исследований в области архитектуры и градостроительства, связанных с изучением и моделированием микроклимата города и ветровых воздействий на застройку<sup>1</sup> [14, 15].

Исходными данными были выбраны результаты прикладного исследования по моделированию аэрационного режима застройки [16]. Цель исследования — моделирование ветрового воздействия на один из типовых вариантов застройки жилого микрорайона, спроектированного для ветрозащиты территории двора, а также дальнейшее сравнение полученной информации с результатами натурного экспериментального моделирования в аэродинамической трубе.

С технической точки зрения процесс CFD-моделирования задач заключается в последовательном решении дифференциальных уравнений в узлах конечно-объемной сетки, построенной вокруг исследуемого объекта. В свою очередь результаты CFD-моделирования можно представить как трехмерный массив векторных величин скоростей или давлений среды в рамках объема, заданного граничными условиями. При этом важно заметить, что искомое векторное поле не содержит информацию о непосредственной обдуваемой геометрии и для ее визуализации необходимо реализовать импорт внешних трехмерных моделей в полигональном формате. Данный функционал дополнительно повысит гибкость визуализации, так как позволит оперировать представлением тела независимо от векторного поля.

В результате анализа существующих решений был выделен перечень минимально необходимых средств и функциональных возможностей постпроцессора для полноценной визуализации результатов CFD-моделирования. Система визуализации типового постпроцессора, как правило, включает в состав стандартный перечень инструментов для визуального контроля параметров, каждый из которых обладает уникальным методом представления данных:

- 1) Система контурных плоскостей (Countur plane) — двумерное изображение распределения величины в рамках плоскости в виде контурных областей с цветовым кодированием величины.
- 2) Система линий тока (Streamlines) — это трехмерное представление трубки-пути или индикатора потока, по которому пройдет частица нулевой массы в рамках векторного поля скоростей.
- 3) Система векторных графиков (VectorPlot) — визуализация какой-либо переменной в виде векторного поля или вектора в точке приложения с указанием направления и магнитуды.
- 4) Система изоповерхностей (Isosurface) — трехмерный аналог изолинии в виде поверхности

<sup>1</sup> ANSYS Fluent: Flow Modeling & CFD Simulation. URL: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>

с постоянным значением в некоторой части пространства.

Данный набор инструментов в тех или иных вариациях представлен в обоих упомянутых комплексах с незначительными отличиями. Последний из инструментов в списке (система изоповерхностей) является довольно экзотическим методом визуализации для задач архитектурно-строительного приложения и чаще используется для визуализации турбулентных высокоскоростных потоков, поэтому на данном этапе было решено отказаться от его реализации [17]. В свою очередь для системы векторных графиков было решено представить ее в модифицированном виде с помощью системы частиц с возможностью гибкой графической настройки области и скорости симуляции. Принцип подхода к визуализации векторных данных с помощью системы частиц заключается в размещении в расчетной области эмиттера (источника) частиц произвольной формы с возможностью настройки их количества и размера. Каждая из частиц, испускаемая источником, принимает направление движения в соответствии с векторным полем скоростей. Подобный подход был задействован в аналогичном комплексе-прототипе CFDtoUnity3D [18]. Данный продукт также предназначен для визуализации векторных данных из CFD-экспериментов, но не поддерживает систему виртуальной реальности и сетевое взаимодействие, кроме того, система частиц в продукте не поддерживает цветное кодирование частиц в зависимости от скорости в точке. Пример работы рассматриваемого продукта для визуализации движения ветра вокруг застройки приведен на рис. 1.

Определив круг минимальных инструментов визуализации, а также специальные функциональные требования к комплексу, можно определить перечень подсистем или модулей, которые должен содержать комплекс. В них входит:

1. Система импорта и обработки данных из внешнего решателя.
2. Система графического интерфейса для настольного и VR-исполнения.
3. Система инструментов визуализации.
4. Сетевая подсистема — для реализации клиент-серверного взаимодействия.

5. Общая схема архитектуры комплекса в виде крупных модулей приведена на рис. 2.

Упрощенный алгоритм работы комплекса: программа получает ASCII файл с результатами расчета из системы CFD-моделирования и передает полученные данные модулю обработки (парсинга). Модуль парсера осуществляет первичную обработку данных и передает их модулю визуализации, который может оперировать ими с помощью одной из четырех подсистем визуализации в трехмерной сцене в настольном (desktop) или VR-режимах. Унификация ввода от пользователя достигается при помощи менеджера ввода, автоматически распознающего тип подключенного оборудования. Пользователь может загружать файл задания для визуализации, файл трехмерной модели исследуемого тела, настраивать параметры модулей визуализации, перемещать эмиттеры модулей визуализации, а также менять их геометрические параметры. Сетевая модель комплекса подразумевает наличие хост-сервера, занимающегося синхронизацией ввода от пользователя с аналогичными удаленно-запущенными экземплярами программы. В качестве выходного файла пользователь может сгенерировать снимки экрана или видеозапись трехмерной симуляции, а также выгрузить изображения с секущих плоскостей или плоскостей с векторами.

#### Система обмена и обработки данных

Большинство современных систем CFD-моделирования позволяет экспортировать данные решения в текстовый файл в формате ASCII с разделением данных запятой. Такой способ экспорта информации в том или ином виде поддерживается большинством современных систем моделирования. Поэтому за основу протокола и формата обмена данными был взят формат экспорта из системы Fluent, так как он является наиболее простым и человеко-читаемым. При сохранении или экспорте информации из системы Fluent пользователь может выбрать готовый шаблон сохранения результатов расчетов в CSV-файл с определением перечня характеристик для сохранения. В результате экспорта данных создается текстовый файл с перечнем значений координат каждой ячейки и значений экспортируемых

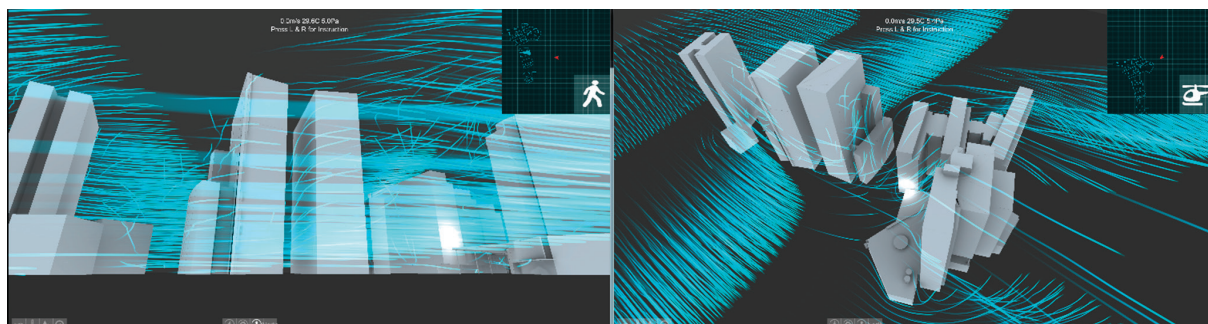


Рис. 1. Пример работы CFDtoUnity3D в режиме визуализации системой частиц

Fig. 1. An example of CFD to Unity3D product in the particle system visualization mode

величин в ней. Тем не менее для других продуктов сохранение результатов в этом формате не является стандартным механизмом и требует дополнительных преобразований. Так, для продукта OpenFOAM представление всех данных проекта и результатов реализовано в простом текстовом формате, но сведения не могут быть автоматически сохранены в нужном формате. Для достижения желаемого формата представления результатов можно прибегнуть к одному из двух способов автоматической конверсии данных в структурированные ASCII-структуры. Первый способ заключается в использовании встроенной функции FoamDataToFluent, которая позволяет сконвертировать результаты расчетов в файл формата .dat, который может быть открыт в пакете Fluent [19]. Также существует возможность использования встроенной утилиты FoamToVTK, которая позволяет собрать все результаты в файл формата VTK [20]. В результате данных манипуляций удается получить структурированный файл, поддающийся синтаксическому анализу и автоформатированию в модуле парсинга. Обработка входных данных в модуле парсинга заключается в построчном чтении входного файла во временный массив данных для последующего распределения значений по трехмерным координатам ячеек заранее созданного векторного поля с регулярной сеткой.

На этом этапе без дополнительной обработки неизбежно возникают артефакты семплинга (выборки) в виде пропусков данных, когда выборка значений с регулярным шагом не совпадает с распределением входных сведений. Это несовпадение объясняется особенностями построения расчетных сеток в большинстве существующих CFD-пакетов, где конечно-объемные сетки, как правило, носят неструктурированный характер. Такая особенность вызвана необходимостью повышения плотности сетки вблизи исследуемого объекта для увеличения пространственного разрешения в важных областях. Таким образом, исходные необработанные результаты CFD-моделирования, как правило, представляют собой массив неструктурированных в пространстве данных (non-uniformly sampled data) или scattered data [21, 22]. Для решения этих проблем целесообразно произвести интерполяцию входных данных для заполнения промежутков с последующей передискретизацией полученного поля скоростей к новой регулярной сетке. Для данной задачи не подходят стандартные методы двумерной билинейной или трилинейной интерполяции [23], поэтому необходимо применение специализированных методов трехмерной интерполяции неравномерных данных. В настоящее время существует относительно большое количество современных методов интерполяции неравномерных данных [24]. Наиболее оптималь-

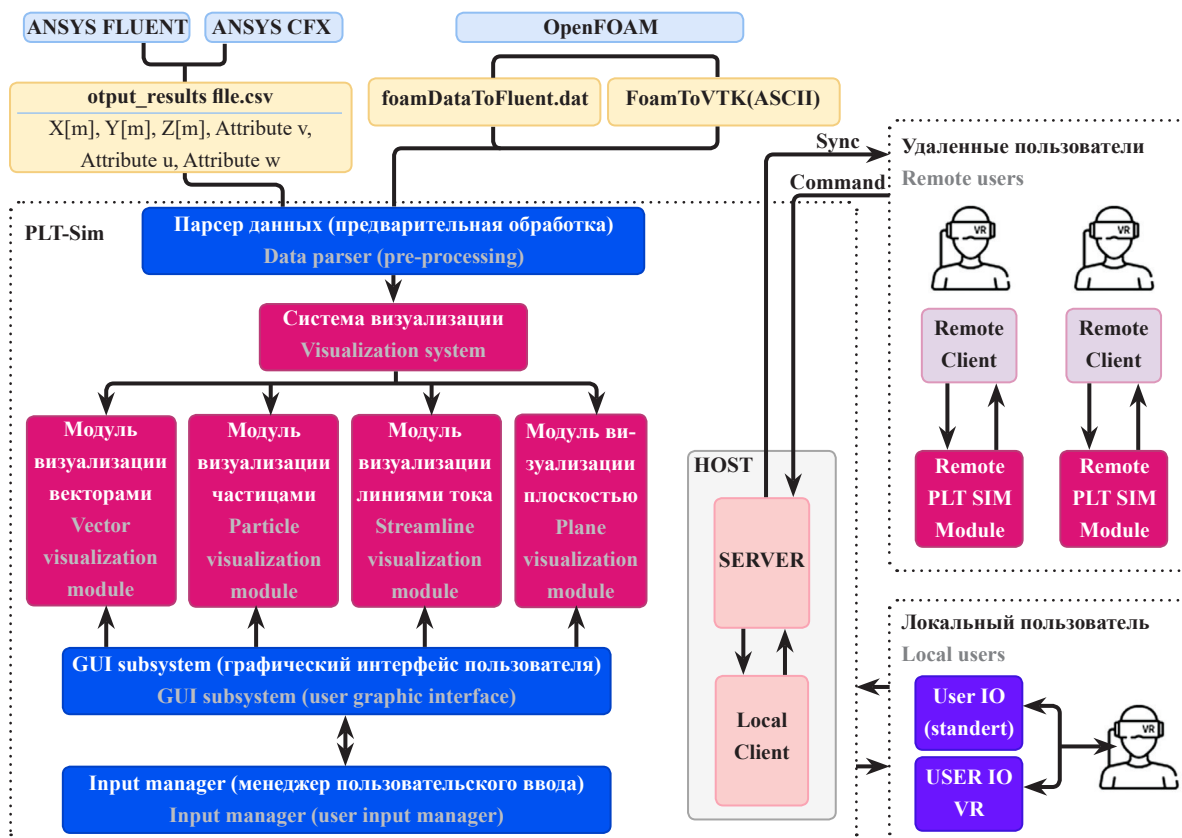


Рис. 2. Блок-схема общей архитектуры системы  
 Fig. 2. The block diagram of the general system concept

ным по скорости работы и реализации для текущей задачи оказался метод обратных взвешенных расстояний или метод Шепарда [25]. Этот метод базируется на допущении о том, что объекты, находящиеся поблизости, более подобны друг другу, чем удаленные друг от друга. Метод Шепарда позволяет регулировать степень влияния удаленных значений на отдельные точки с помощью параметра степени. В дальнейшем планируется использование более производительного метода интерполяции ближайшей окрестности [26]. Пример работы метода обратных взвешенных расстояний приведен на рис. 3.

### Описание алгоритма сетевой удаленной работы

Для работы в сетевом режиме с удаленными пользователями удобнее всего использовать систему клиент-серверного взаимодействия, в которой основной пользователь будет являться хостом (сервером с возможностями клиента). Для более удобной коммуникации и процесса подключения пользователей реализован механизм виртуальных комнат. Подключившись к комнате по IP-адресу, пользователи должны ввести свое имя, скачать файл с результатами и обменяться начальными параметрами симуляции.

Как только все подключенные пользователи переходят в состояние готовности, инициатор комнаты запускает сетевой режим работы комплекса. Для начала файл продувки инициализирует полученные параметры и загружается у всех удаленных пользователей. Далее пользователи появляются в синхронизированной области, где могут наблюдать аватары других пользователей, а также методы визуализации данных.

В соответствии с общей архитектурой комплекса, при изменении параметров визуализации одним из пользователей, происходит синхронизация данных для всех клиентов. При этом каждый пользователь обладает независимыми средствами ввода и вывода информации (комплект виртуальной реальности или монитор с клавиатурой и мышью) и может наблюдать за симуляцией независимо. Для реализации сетевого взаимодействия была выбрана бесплатная программная реализация на базе Unity – Mirror из встроенного магазина приложений. Эта

высокоуровневая сетевая библиотека предназначена для создания многопользовательских игр с возможностью использования удаленного сервера на базе любого из клиентов. Для этой цели внутри основного модуля программы у каждого пользователя реализован модуль сервера и локальный клиент для взаимодействия с самим собой в случае инициации совместной работы. Реализация сетевой работы специалистов в среде виртуальной реальности позволит создать опыт, имитирующий реальное общение и взаимодействие при постобработке результатов моделирования. Находясь в общем виртуальном пространстве модели в масштабе отдельного человека, специалисты могут воспринимать гораздо больший спектр визуальной информации о моделируемых параметрах среды, будь то температура или скорость ветра в отдельной точке.

### Описание прикладной задачи, используемой для испытаний комплекса

Как было указано выше, для испытания и отладки комплекса была выбрана задача из прикладного исследования по компьютерному моделированию аэрационного режима жилой застройки с целью проветривания и ветрозащиты [16]. Объектом исследования являлось обтекание ветровым потоком серии вариантов архитектурно-планировочной композиции жилой застройки, состоящей из пяти зданий высотой в пять этажей ( $H = 15$  м), параллельных друг другу. Ширина зданий  $B$  принята равной 12 м. Здания отстоят друг от друга на расстоянии, равном высоте  $1 H$ , и смещены в перпендикулярном направлении на  $1/3$  длины здания  $L$  ( $L = 36$  м). Схема расположения зданий, их размеры и направление ветра показаны на рис. 4.

Расчеты проводились в программном комплексе ANSYS Fluent. Создание сетки конечных элементов производилось во встроенном модуле Meshing, был выбран комбинированный метод мультизонного разбиения с применением функции Inflation для создания равномерной плотной сетки у нижней границы расчетной области. Также применен метод уточнения сетки по геометрии (Body of influence) для дополнительного уплотнения сетки в районе застройки. В конечном результате была получена рабочая область, насчитывающая около 3,5 млн яче-

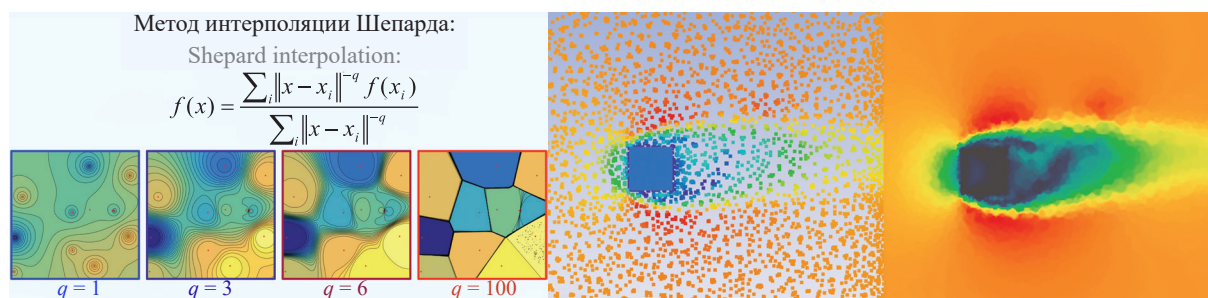


Рис. 3. Схема исследуемой композиции (слева) и ее расположения в расчетной области (справа)  
Fig. 3. General layout pattern (left) and its position in the computational domain (right)

ек. Также применена UDF-функция (User defined function) для описания профиля изменения скорости ветра с высотой [27].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Выгрузка результатов и работа модулей визуализации

Для ускорения задачи, а также повышения детализации рассматриваемого случая было принято решение выгрузить результаты из уменьшенной области вблизи исследуемых зданий, где плотность сетки максимальная. В результате получен файл выгрузки для региона размером  $500 \times 400 \times 100$  м для осей  $x, y, z$  соответственно. После интерполяции полученных нерегулярных точек поле значений приведено к новой регулярной сетке с разрешением  $250 \times 200 \times 50$  разбиений, что дает векторное поле с разрешением ячейки в 2 м. В результате тестового экспорта получен csv файл с результатами тестовой продувки архитектурной композиции, содержащий порядка 2,5 миллиона значений векторов скорости ветра в каждой ячейке. Полученный файл был импортирован в тестовую сцену, а далее к нему были поочередно применены модули визуализации.

Для первоначальной проверки качества выгруженного векторного поля на предмет артефактов и ошибок применен инструмент визуализации системой векторов. С целью реализации визуального представления векторов скоростей в ячейках выбран стандартный компонент используемого редактора: Handles [28]. Компонент позволяет визуализировать

векторы в заданных точках пространства в виде трехмерных отрезков с направлением и магнитудой, полученными от системы визуализации в виде трех компонент скорости в точке. Работа модуля заключается в циклическом поиске центров каждой ячейки регулярной сетки, с последующим помещением в нее вектора, принимающего цвет, длину и направление в соответствии со значением величины. Результат визуализации задачи с помощью данного модуля приведен на рис. 5. С целью уменьшения визуального наложения в обоих случаях была проведена нормализация длины векторов и выбран режим проекции на плоскость.

Полученные в итоге сравнения картины распределения свидетельствуют о безошибочной работе модуля обработки и парсинга. На результирующем изображении видно, что использование нерегулярной сетки с уплотнением возле модели позволяет значительно сэкономить количество ячеек, с другой стороны, визуализация векторов на предискретизированной сетке дает возможность добиться большей плотности и равномерности изображения. Тем не менее данный метод является скорее отладочным, так как позволяет быстро проверить общую целостность и правильность данных. Для более наглядной визуализации в интерактивном режиме гораздо удобнее пользоваться модификацией этого метода в виде использования для визуализации системы частиц.

Для реализации модуля визуализации системой частиц был применен стандартный компонент редактора Unity3D — Particle System [28]. Данный

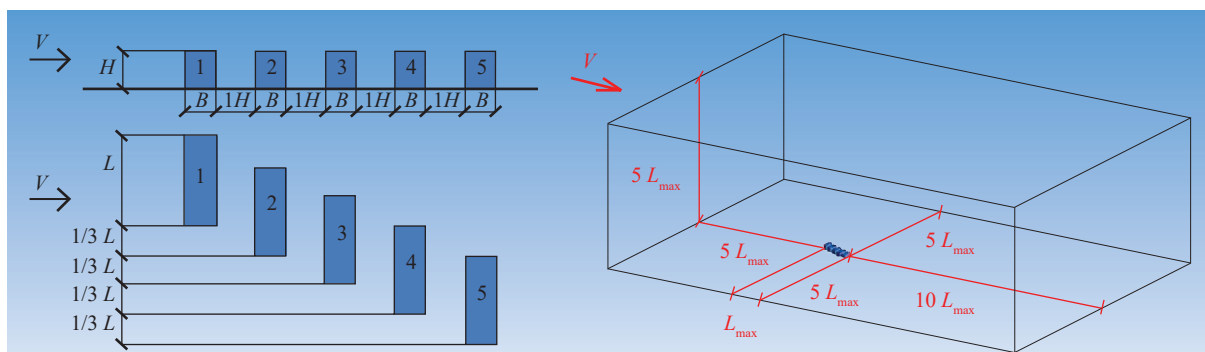


Рис. 4. Схема исследуемой композиции (слева) и ее расположения в расчетной области (справа)

Fig. 4. General layout pattern (left) and its position in the computational domain (right)

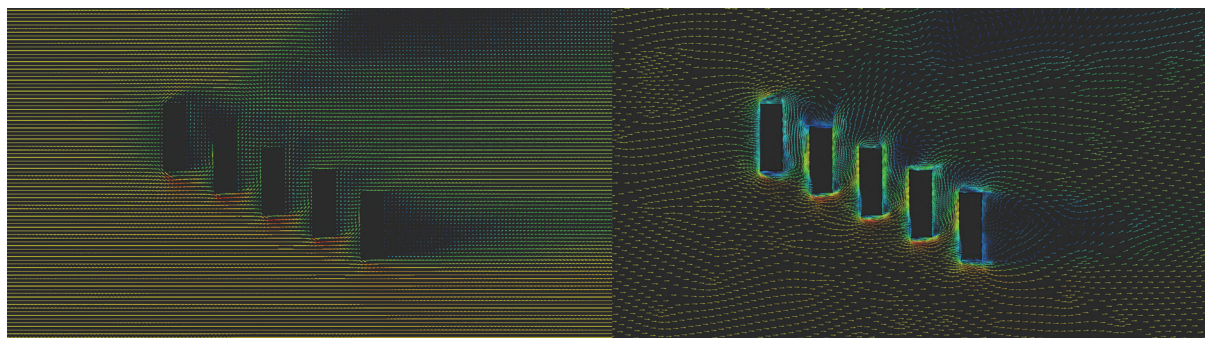


Рис. 5. Работа модуля визуализации системой векторов (слева) и сравнение с ANSYS (справа)

Fig. 5. Application of the vector visualization module (left) and its comparison with ANSYS (right)

компонент генерирует множественные экземпляры двумерных изображений (спрайтов) в случайных точках ограниченной эмиттером зоны. Система позволяет задавать время жизни одной частицы в секундах для ограничения дальности полета. Модуль дает возможность в реальном времени наблюдать локальное движение воздушных потоков при использовании эмиттера с малыми размерами или визуализировать крупные потоки при эмиттере большой площади. Проходя через ячейки векторного поля, частицы принимают скорость и направление вектора в точке и перемещаются к следующей ячейке, затем процесс повторяется.

В качестве дополнительного режима для данного модуля был реализован механизм trail-рендеринга (рисование визуального следа частицы) в виде трассирующих следов частицы в пространстве. В этом режиме каждая частица оставляет за собой постепенно сужающийся след, позволяющий более наглядно продемонстрировать ее траекторию, не прибегая к высокой плотности заполнения. На рис. 6 изображен пример работы модуля на тестовых данных.

С целью реализации модуля визуализации линиями тока, в литературе часто называемого streamline [29], использован стандартный компонент движка Line Renderer [28]. Он часто применяется в рамках этой среды в качестве инструмента для процедурной генерации вспомогательных построений и соединения точек в трехмерном пространстве. Принцип работы модуля во многом повторяет работу модуля

системы частиц с некоторыми отличиями, в данном случае визуализация производится непрерывной трехмерной линией тока, которая соединяет соседние ячейки на основании направления из предыдущей, образуя таким образом трехмерную линию с изменяемым от скорости цветом. На рис. 7 показан пример функционирования данного модуля.

Для последнего модуля визуализации секущей плоскостью были использованы стандартные компоненты Mesh Filter и Mesh Renderer [28]. С их помощью создается трехмерная плоскость в пространстве векторного поля, далее плоскости присваивается процедурная текстурная карта с цветами пикселей, получаемыми из пересекаемых плоскостью ячеек. Пользователь может выбрать ось визуализации и смещение (координаты) относительно расчетной области. На рис. 8 приведен пример работы модуля в режиме отладки на тестовой задаче и сравнение с аналогичным режимом визуализации в ANSYS Fluent.

### Испытания работы комплекса в режиме виртуальной реальности

Испытания системы в режиме виртуальной реальности проведены с помощью шлема Oculus Quest 2. В качестве системы для визуализации использовалась рабочая станция потребительского класса со средними по меркам 2021 г. показателями: 12-поточный процессор Ryzen 3600 16 Гб памяти и видеоадаптер AMD RX 5700 XT (на рис. 9 представлен внешний вид системы и вид из VR-гарнитуры). При испытаниях работы в режиме вир-

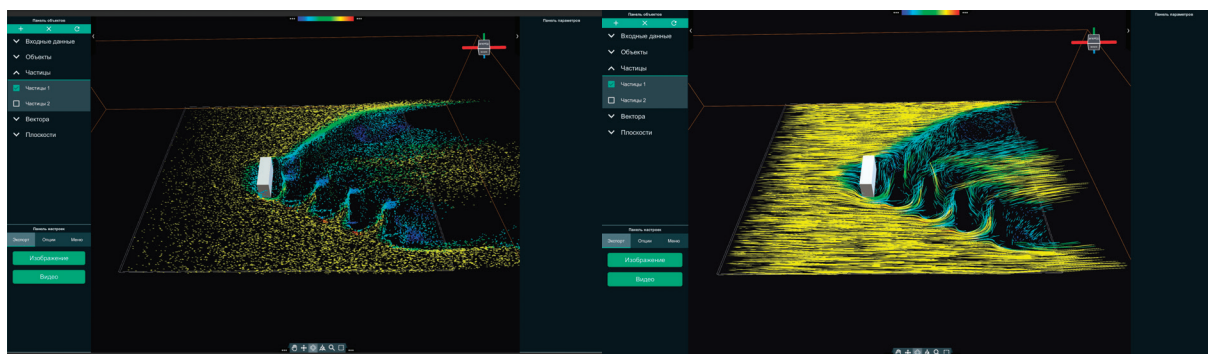


Рис. 6. Работа модуля визуализации системой частиц (слева) и в режиме трассирования (справа)

Fig. 6. Particle system visualization module in operation (left) and the same module in operation in the tracing mode (right)



Рис. 7. Иллюстрация работы модуля визуализации линиями тока

Fig. 7. An illustration of the streamline visualization module in operation

туальной реальности система показала очень высокую производительность при стереоскопическом рендеринге в разрешении  $3664 \times 1832$  пикселя с частотой кадров более 100 кадров/с при визуализации потока из более чем 100 000 частиц или отображении более 2000 линий тока одновременно.

Для работы с удаленным партнером в режиме виртуальной реальности необходимо создать виртуальную комнату и заранее поделить с ним файлом с результатами, после чего осуществляется подключение, и пользователи могут наблюдать аватары друг друга в виртуальном пространстве. Работа в сетевом режиме с применением средств виртуальной реальности подразумевает визуализацию только трех опорных точек для каждого пользователя: головы и двух конечностей. Для идентификации пользователей, а также для визуального обозначения места взаимодействия у каждого пользователя имеется виртуальная указка в виде «лазерного» луча соответствующего цвета, испускаемого из контроллеров. С помощью лучей пользователи осуществляют ввод данных на интерфейс-дублер, полностью повторяющий панели управления из настольной версии комплекса. С целью повышения удобства восприятия графического интерфейса пользователя была использована система «изогнутого холста», которая дает возможность отображать панели настоль-

ного интерфейса на мнимой изогнутой поверхности на фиксированном расстоянии от пользователя. При резком повороте головы пользователей — данные панели перемещаются к центру виртуального обзора VR-гарнитуры с определенной задержкой и сглаживанием, позволяя уменьшить визуальную нагрузку на глаза.

Взаимодействие и перемещение пользователей реализуется путем моторного перемещения в рамках очерченной области либо посредством смещения точки центра пользователя относительно расчетного случая. Реализация внешнего VR-постпроцессора позволяет работать с компактным файлом-представлением результатов без необходимости разворачивать расчетную модель у каждого из участников сессии, при этом сохраняется возможность оперирования с данными в реальном времени с помощью перемещения участников совместной визуализации в рамках виртуальной застройки. При визуализации задач большого масштаба, с большим градиентом плотности расчетной сетки, процесс визуализации в мелких областях становится довольно рутинным и медленным. Использование системы виртуальной реальности, вкупе с возможностью одновременной работы в сетевом режиме и наличии голосового канала связи позволяет двум исследователям находиться сразу в двух точках расчетной области, что

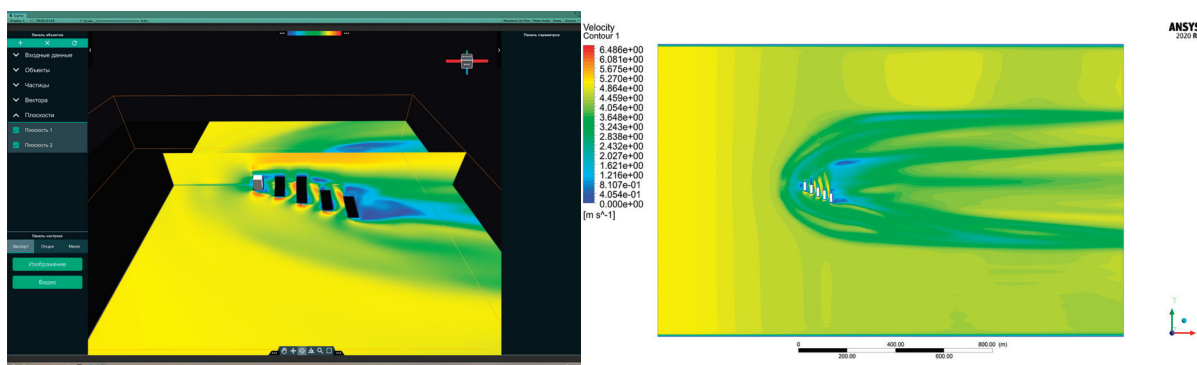


Рис. 8. Иллюстрация работы модуля визуализации секущей плоскостью и контурный график, полученный напрямую в ANSYS Fluent

Fig. 8. An illustration of the plane visualization module in operation and an original contour plot obtained directly in ANSYS Fluent

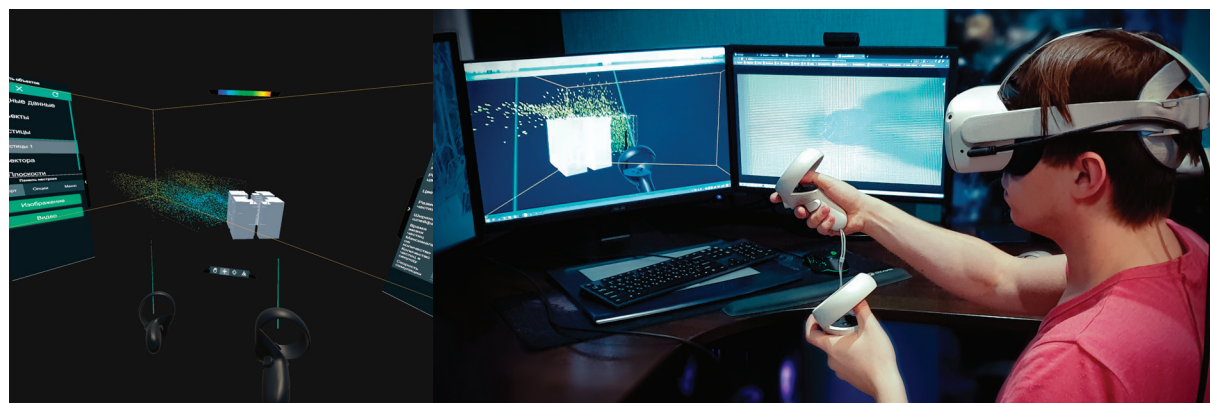


Рис. 9. Пример работы системы: вид из VR гарнитуры (слева); внешний вид системы (справа)

Fig. 9. Demonstration of the VR view (left) and the appearance of the system (right)

в перспективе даст возможность отслеживать одновременно несколько взаимосвязанных параметров среды (давление и температуру) при варьировании параметров визуализации или проигрывании анимации из последовательности состояний векторного поля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках реализации системы PLT-Sim была проработана архитектура комплекса, а также реализованы алгоритмы основных подсистем визуализации данных в виде векторов, системы частиц, линий тока и плоскостей. При реализации первой функциональной версии системы достигнуты все планируемые показатели и реализованы следующие функциональные возможности:

- главная идея — визуализация результатов CFD-моделирования параметров микроклимата застройки в виртуальной реальности с помощью векторов, системы частиц, линий тока, секущих плоскостей;
- поддержка визуализации и ввода как в настольном режиме, так и в VR-окружении;
- проработан и заложен механизм импорта результатов из разных систем моделирования;
- осуществлен базовый сетевой режим работы на основе клиент-серверного взаимодействия;

- реализована возможность экспорта результатов в графические форматы (.png, mp4, gif).

Полученные на этом этапе результаты позволили отработать на практике основные положения и идеи по применению технологий виртуальной реальности для VR-визуализации прикладных гидродинамических задач в рамках архитектурно-строительной деятельности. Возможность взаимодействия со средой в масштабе пешехода разрешит записывать виртуальные «прогулки» по проектируемой застройке с одновременной визуализацией параметров в поле деятельности человека (на высоте до 2 м). Данный режим оставляет большой задел на будущее в виде одновременной визуализации разных параметров из единого файла результатов для каждого пользователя, что значительно экономит время и ресурсы, позволяя «разделить работу» по анализу характеристик среды между удаленными исследователями.

В ходе дальнейшего развития проекта планируется провести рефакторинг кодовой базы и ее оптимизацию. В текущем варианте прототип доказал свою пригодность для VR-визуализации расчетных задач, содержащих более двух млн узлов, далее планируется довести данный показатель до более чем одного млрд узлов, что в несколько раз перекроет планируемые показатели.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Оленьков В.Д., Пузырев П.И. Численное моделирование ветрового воздействия на уникальные здания // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2014. № 4. С. 87–89.
2. Оленьков В.Д., Тазеев Н.Т. Расчет ветровых нагрузок с учетом локальных изменений скорости ветра в застройке // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2019. Т. 19. № 4. С. 5–17. DOI: 10.14529/build190401
3. Poddaeva O., Dunichkin I., Gribach J. Conducting calculating and experimental researches of the bioclimatic comfort of the residential area territory // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 022029. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022029
4. Оленьков В.Д. Учет ветрового режима городской застройки при градостроительном планировании с использованием технологий компьютерного моделирования // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2017. Т. 17. № 4. С. 21–27. DOI: 10.14529/build170403
5. Montazeri H., Toparlar Y., Blocken B., Hensen J.L.M. Simulating the cooling effects of water spray systems in urban landscapes: A computational fluid dynamics study in Rotterdam, The Netherlands //

- Landscape and Urban Planning. 2017. Vol. 159. Pp. 85–100. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2016.10.001
6. Toparlar Y., Blocken B. The effect of an urban park on the microclimate in its vicinity: A case study for Antwerp, Belgium // International Journal of Climatology. 2018. Vol. 38. Pp. e303–e322. DOI: 10.1002/joc.5371
7. Jeong W., Seong J. Comparison of effects on technical variances of computational fluid dynamics (CFD) software based on finite element and finite volume methods // International Journal of Mechanical Sciences. 2014. Vol. 78. Pp. 19–26. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2013.10.017
8. Adwernat S., Wolf M., Gerhard D. Optimizing the design review process for cyber-physical systems using virtual reality // Procedia CIRP. 2020. Vol. 91. Pp. 710–715. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.115
9. Milovanovic J., Moreau G., Siret D., Miguet F. Virtual and augmented reality in architectural design and education an immersive multimodal platform to support architectural pedagogy // Future Trajectories of Computation in Design, 17th International Conference, CAAD Futures 2017. 2017.
10. Narasimha S., Dixon E., Bertrand J.W., Madathil K.C. An empirical study to investigate the efficacy of collaborative immersive virtual reality systems for

- designing information architecture of software systems // *Applied Ergonomics*. 2019. Vol. 80. Pp. 175–186. DOI: 10.1016/j.apergo.2019.05.009
11. *Shih J.Y., Borkiewicz K., Christensen A.J., Cox D.* Interactive cinematic scientific visualization in unity // *ACM SIGGRAPH 2019 Posters*. 2019. DOI: 10.1145/3306214.3338588
  12. *Muttenthaler L.* Scripted CFD simulations and postprocessing in Fluent and ParaVIEW. 2017. DOI: 10.13140/RG.2.2.11645.41446
  13. *Ahrens J., Geveci B., Law Ch.* ParaView. 2005. DOI: 10.1016/B978-012387582-2/50038-1
  14. *Valger S.A., Fedorova N.N.* CFD Methods in architecture and city planning // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1425. P. 012124. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012124
  15. *Olenkov V.D., Lazareva I.V., Biryukov A.D.* Numerical simulation of wind flow around building complex with different software approaches // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 687. P. 055066. DOI: 10.1088/1757-899x/687/5/055066
  16. *Оленьков В.Д., Колмогорова А.О., Сапогова А.Е.* Компьютерное моделирование аэрационного режима жилой застройки с целью проветривания и ветрозащиты // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура*. 2021. Т. 21. № 1. С. 5–12. DOI: 10.14529/build210101
  17. *Letzger J., Keßler M., Krämer E.* Simulation of dynamic stall on an elastic rotor in high-speed turn flight // *Journal of the American Helicopter Society*. 2020. Vol. 65. Issue 2. Pp. 1–12. DOI: 10.4050/jahs.65.022002
  18. *Berger M., Cristie V.* CFD post-processing in Unity3D // *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 51. Pp. 2913–2922. DOI: 10.1016/j.procs.2015.05.476
  19. *Avila L.S.* The VTK User's Guide. 11th ed. Kitware, 2010.
  20. *Schroeder W., Martin K., Lorensen B.* The visualization toolkit. 4th ed. Kitware, 2006.
  21. *Yaroslavsky L.P., Shabat G., Salomon B.G., Ideses I.A., Fishbain B.* Nonuniform sampling, image recovery from sparse data and the discrete sampling theorem // *Journal of the Optical Society of America A*. 2009. Vol. 26. Issue 3. P. 566. DOI: 10.1364/josaa.26.000566
  22. *Rosenthal P., Linsen L.* Direct isosurface extraction from scattered volume data // *EuroVis06: Joint Eurographics — IEEE VGTC Symposium on Visualization, Lisbon, Portugal, 8–10 May 2006*. 2006. Pp. 99–106. DOI: 10.2312/VisSym/EuroVis06/099-106
  23. *Arce G.R., Bacca J., Paredes J.L.* The essential guide to image processing. Academic Press, 2009. Pp. 263–291.
  24. *Ohtake Y., Belyaev A., Seidel H.-P.* 3D scattered data interpolation and approximation with multi-level compactly supported RBFs // *Graphical Models*. 2005. Vol. 67. Issue 3. Pp. 150–165. DOI: 10.1016/j.gmod.2004.06.003
  25. *Nouisser O., Zerroudi B.* Modified Shepard's method by six-points local interpolant // *Journal of Applied Mathematics and Computing*. 2021. Vol. 65. Issue 1–2. Pp. 651–667. DOI: 10.1007/s12190-020-01409-5
  26. *Park S.W., Linsen L., Kreylos O., Owens J.D., Hamann B.* Discrete Sibson interpolation // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2006. Vol. 12. Issue 2. Pp. 243–253. DOI: 10.1109/TVCG.2006.27
  27. *Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В.* Основы работы в ANSYS 17. М. : ДМК Пресс, 2017. 209 с.
  28. *Wells R.* Unity 2020 By Example: A project-based guide to building 2D, 3D, augmented reality, and virtual reality games from scratch. 3rd ed. Birmingham, England : Packt Publishing, 2020.
  29. *Marchesin S., Chen C., Ho C., Ma K.-L.* View-dependent streamlines for 3D vector fields // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2010. Vol. 16. Issue 6. Pp. 1578–1586. DOI: 10.1109/TVCG.2010.212

Поступила в редакцию 30 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 12 мая 2021 г.

Одобрена для публикации 12 мая 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Валентин Данилович Оленьков** — доктор технических наук, доцент, профессор, старший преподаватель кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Архитектурно-строительный институт; **Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 567686, Scopus: 57197828695, ResearcherID: L-8094-2014; centernasledie@mail.ru;

**Александр Дмитриевич Бирюков** — аспирант кафедры строительного производства и теории сооружений, Архитектурно-строительный институт; **Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет) (ЮУрГУ (НИУ))**; 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 1086576, Scopus: 57205660236; crayrender@gmail.com;

**Алена Олеговна Колмогорова** — старший преподаватель кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, аспирант кафедры строительного производства и теории сооружений, Архитектурно-строительный институт; **Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский уни-**

верситет) (ЮУрГУ (НИУ)); 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76; РИНЦ ID: 890444, Scopus: 57199391667, ResearcherID: Y-5422-2018, ORCID: 0000-0001-5301-5191; kolmogorovaao@susu.ru.

## REFERENCES

- Olenkov V.D., Puzyrev P.I. Numerical simulation of wind load on a unique building. *Akademicheskij vestnik UralNIIProekt RAASN*. 2014; 4:87-89. (rus.).
- Olenkov V.D., Tazeev N.T. Calculation of wind loads taking into account local changes in wind speed in urban development area. *Bulletin of SUSU. Series "Construction Engineering and Architecture"*. 2019; 19(4):5-17. DOI: 10.14529/build190401 (rus.).
- Poddaeva O., Dunichkin I., Gribach J. Conducting calculating and experimental researches of the bioclimatic comfort of the residential area territory. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:022029. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022029
- Olenkov V.D. Accounting for wind regime of an urban development in town planning with the use of computer simulation technologies. *Bulletin of South Ural State University. Series: Construction Engineering and Architecture*. 2017; 17(4):21-27. DOI: 10.14529/build170403 (rus.).
- Montazeri H., Toparlar Y., Blocken B., Hensen J.L.M. Simulating the cooling effects of water spray systems in urban landscapes: A computational fluid dynamics study in Rotterdam, The Netherlands. *Landscape and Urban Planning*. 2017; 159:85-100. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2016.10.001
- Toparlar Y., Blocken B. The effect of an urban park on the microclimate in its vicinity: A case study for Antwerp, Belgium. *International Journal of Climatology*. 2018; 38:e303-e322. DOI: 10.1002/joc.5371
- Jeong W., Seong J. Comparison of effects on technical variances of computational fluid dynamics (CFD) software based on finite element and finite volume methods. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014; 78:19-26. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2013.10.017
- Adwernat S., Wolf M., Gerhard D. Optimizing the design review process for cyber-physical systems using virtual reality. *Procedia CIRP*. 2020; 91:710-715. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.115
- Milovanovic J., Moreau G., Siret D., Miquet F. Virtual and augmented reality in architectural design and education an immersive multimodal platform to support architectural pedagogy. *Future Trajectories of Computation in Design, 17th International Conference, CAAD Futures 2017*. 2017.
- Narasimha S., Dixon E., Bertrand J.W., Madathil K.C. An empirical study to investigate the efficacy of collaborative immersive virtual reality systems for designing information architecture of software systems. *Applied Ergonomics*. 2019; 80:175-186. DOI: 10.1016/j.apergo.2019.05.009
- Shih J.Y., Borkiewicz K., Christensen A.J., Cox D. Interactive cinematic scientific visualization in unity. *ACM SIGGRAPH 2019 Posters*. 2019. DOI: 10.1145/3306214.3338588
- Muttenthaler L. *Scripted CFD simulations and postprocessing in Fluent and ParaVIEW*. 2017. DOI:10.13140/RG.2.2.11645.41446
- Ahrens J., Geveci B., Law Ch. *ParaView*. 2005. DOI: 10.1016/B978-012387582-2/50038-1
- Valger S.A., Fedorova N.N. CFD methods in architecture and city planning. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1425:012124. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012124
- Olenkov V.D., Lazareva I.V., Biryukov A.D. Numerical simulation of wind flow around building complex with different software approaches. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 687:055066. DOI: 10.1088/1757-899x/687/5/055066
- Olenkov V.D., Kolmogorova A.O., Sapogova A.E. Computer simulation of the aeration mode of residential development for ventilation and wind protection. *Bulletin of SUSU. Series "Construction Engineering and Architecture"*. 2021; 21(1):5-12. DOI: 10.14529/build210101 (rus.).
- Letzgus J., Keßler M., Krämer E. Simulation of dynamic stall on an elastic rotor in high-speed turn flight. *Journal of the American Helicopter Society*. 2020; 65(2):1-12. DOI: 10.4050/jahs.65.022002
- Berger M., Cristie V. CFD post-processing in Unity3D. *Procedia Computer Science*. 2015; 51:2913-2922. DOI: 10.1016/j.procs.2015.05.476
- Avila L.S. *The VTK User's Guide*. 11th ed. Kitware, 2010.
- Schroeder W., Martin K., Lorensen B. *The Visualization Toolkit*. 4th ed. Kitware, 2006.
- Yaroslavsky L.P., Shabat G., Salomon B.G., Ideses I.A., Fishbain B. Nonuniform sampling, image recovery from sparse data and the discrete sampling theorem. *Journal of the Optical Society of America A*. 2009; 26(3):566. DOI: 10.1364/josaa.26.000566
- Rosenthal P., Linsen L. Direct isosurface extraction from scattered volume data. *EuroVis06: Joint Eurographics — IEEE VGTC Symposium on Visualization, Lisbon, Portugal, 8-10 May 2006*. 2006; 99-106. DOI: 10.2312/VisSym/EuroVis06/099-106
- Arce G.R., Bacca J., Paredes J.L. *The Essential Guide to Image Processing*. Academic Press, 2009; 263-291.

24. Ohtake Y., Belyaev A., Seidel H.-P. 3D scattered data interpolation and approximation with multilevel compactly supported RBFs. *Graphical Models*. 2005; 67(3):150-165. DOI: 10.1016/j.gmod.2004.06.003
25. Nouisser O., Zerroudi B. Modified Shepard's method by six-points local interpolant. *Journal of Applied Mathematics and Computing*. 2021; 65(1-2):651-667. DOI: 10.1007/s12190-020-01409-5
26. Park S.W., Linsen L., Kreylos O., Owens J.D., Hamann B. Discrete Sibson interpolation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2006; 12(2):243-253. DOI: 10.1109/TVCG.2006.27
27. Fedorova N.N., Val'ger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. *Fundamentals of work in ANSYS 17*. Moscow, DMK Press, 2017; 209. (rus.).
28. Wells R. *Unity 2020 By Example: A project-based guide to building 2D, 3D, augmented reality, and virtual reality games from scratch. 3rd ed.* Birmingham, England, Packt Publishing, 2020.
29. Marchesin S., Chen C., Ho C., Ma K.-L. View-dependent streamlines for 3D vector fields. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2010; 16(6):1578-1586. DOI: 10.1109/TVCG.2010.212

Received March 30, 2021.

Adopted in revised form on May 12, 2021.

Approved for publication on May 12, 2021.

**BIONOTES: Valentin D. Olenkov** — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Senior Lecturer of the Department of Town Planning, Engineering Systems and Networks; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (National Research University))**; 76 Lenin avenue, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RISC: 567686, Scopus: 57197828695, ResearcherID: L-8094-2014; centernasledie@mail.ru;

**Aleksandr D. Biryukov** — postgraduate of the Department of Construction Production and Theory of Structures; **South Ural State University (National research university) (SUSU (National Research University))**; 76 Lenin avenue, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RISC: 1086576, Scopus: 57205660236; crayrender@gmail.com;

**Alena O. Kolmogorova** — Senior Lecturer of the Department of Town Planning, Engineering Systems and Networks, postgraduate of the Department of Construction Production and Theory of Structures; **South Ural State University (National Research University) (SUSU (National Research University))**; 76 Lenin avenue, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation; ID RISC: 890444, Scopus: 57199391667, ResearcherID: Y-5422-2018, ORCID: 0000-0001-5301-5191; kolmogorovaao@susu.ru.

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

УДК 624.074

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.570-576

## The analysis of dependence of the vibration frequency of a space cantilever truss on the number of panels

Mikhail N. Kirsanov, Oleg V. Vorobyev

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The first (lowest) frequency of natural vibrations of a structure is one of its most important dynamic characteristics. Analytical solutions supplement numerical ones; they can be efficiently used to perform a rapid assessment of properties of structures, to analyze and optimize constructions and to test numerical results. A space cantilever truss consisting of three planar trusses with a rectangular grid is considered in the article. The objective is to find the analytical dependence between the frequency of natural vibrations of a structure and the number of panels. It is assumed that the truss mass is distributed among the joints. Only the vertical mass displacement is taken into account.

**Materials and methods.** Forces, arising in cantilever rods, are calculated by the Maple software as symbolic expressions, and the method of joint isolation is used here. The stiffness matrix is identified using the Mohr integral. Rods are assumed to be elastic, they have identical stiffness. The lower value of the vibration frequency is determined using the Dunkerley method. The final calculation formula used to identify the value of the vibration frequency is derived using the method of induction applied to a series of analytical solutions developed for trusses with a consistently increasing number of panels. When common members of sequences are found, *genfunc* operators of the Maple system are used. The analytical solution is compared with the numerical solution in terms of the first frequency using the analysis of the system spectrum featuring many degrees of freedom. The eigenvalues of the characteristic matrix are identified using the Eigenvalues operator from the Linear Algebra package.

**Results.** The comparison between the analytical values and the numerical solution shows that the Dunkerley method ensures the accuracy varying from 20 % for a small number of panels to 3 % if the number of panels exceeds ten. The size of the structure, the weight and stiffness of rods have little effect on the accuracy of the obtained values.

**Conclusions.** The lowest value obtained using the Dunkerley method in the form of a fairly compact formula has good accuracy, its application to a space structure with an arbitrary number of panels has a polynomial form equal to the number of panels, and it can be used in practical calculations.

**KEYWORDS:** cantilever truss, vibrations, frequency, Dunkerley method, Maple

**Acknowledgements.** This research enjoyed the support from the Interdisciplinary Scientific and Educational School of Moscow University "Fundamental and Applied Space Research".

**FOR CITATION:** Kirsanov M.N., Vorobyev O.V. The analysis of dependence of the vibration frequency of a space cantilever truss on the number of panels. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(5):570-576. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.570-576 (rus.).

## Расчет зависимости частоты колебаний пространственной консольной фермы от числа панелей

М.Н. Кирсанов, О.В. Воробьев

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Первая (низшая) частота собственных колебаний конструкции является одной из ее важнейших динамических характеристик. Аналитические решения дополняют численные, они удобны для быстрой оценки свойств сооружения и могут быть использованы для анализа и оптимизации конструкции, и выполнять роль тестов для численных результатов. Рассматривается пространственная консольная ферма, составленная из трех плоских ферм с прямоугольной решеткой. Ставится задача найти аналитическую зависимость собственной частоты колебаний конструкции от числа панелей. Предполагается, что масса фермы распределена по узлам. Учитываются только вертикальные перемещения масс.

**Материалы и методы.** Расчет усилий в стержнях консоли в символьной форме производится в программе, созданной в системе компьютерной математики Maple с использованием метода вырезания узлов. Матрица жесткости находится с помощью интеграла Мора. Стержни принимаются упругими с одинаковой жесткостью. Нижняя частота колебаний определяется по методу Донкерлея. По серии аналитических решений для ферм с последовательно увеличивающимся числом панелей методом индукции выводится итоговая расчетная формула для частоты колебаний. При нахождении общих членов последовательностей используются операторы специального пакета genfunc системы Maple. Аналитическое решение сравнивается с численным решением для первой частоты, полученным из анализа спектра системы с многими степенями свободы. Собственные числа характеристической матрицы найдены с помощью оператора Eigenvalues из пакета LinearAlgebra.

**Результаты.** Сравнение аналитической оценки и численного решения показывает, что метод Донкерлея дает точность, меняющуюся от 20 % при малом числе панелей до 3 %, если число панелей больше десяти. Размеры конструкции, массы и жесткость стержней мало влияют на точность приведенной оценки.

**Выводы.** Полученная нижняя оценка по методу Донкерлея в виде достаточно компактной формулы имеет хорошую точность, ее реализация для пространственной конструкции с произвольным числом панелей в виде полиномов по числу панелей может быть применена в практических расчетах.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** консольная ферма, колебания, частота, метод Донкерлея, Maple

*Благодарности.* Работа выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ «Фундаментальные и прикладные космические исследования».

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кирсанов М.Н., Воробьев О.В. The analysis of dependence of the vibration frequency of a space cantilever truss on the number of panels // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 5. С. 570–576. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.570-576

## INTRODUCTION

The calculation of frequencies of natural vibrations of structures is usually performed in the numerical form. For regular, statically determinate trusses, having a periodic structure, some solutions of the oscillation problem are known; they are implemented in the system of computer mathematics in the form of finite formulas that encompass the number of panels in the form of a parameter [1, 2]. Problems of structures and methods used to analyze regular statically determinate rod systems were first raised in [3–5]. The reference book [6] contains various patterns of planar regular trusses and formulas needed to calculate their rigidity for an arbitrary number of panels. Separate analytical solutions, designated for planar statically determinate trusses, that entail the rigidity calculation using the induction method in the Maple system, are found in [7–9]. The induction method applied to these solutions can also be used to solve the problem of an oscillating truss [10–12]. In both cases, the matrix or the stiffness coefficient of a structure is identified using the Mohr integral. Other algorithms are also available for the analysis of regular (planar, space, and statically indeterminate) rod structures [13–15]. Practical problems of trusses, in which vibration frequencies are analyzed, are usually solved using the finite element method and associated with optimization problems [16–20]. Apart

from that, one can single out the solution to problems of nonlinear oscillations [21–23].

In this paper, we consider a cantilever-type space truss having  $n$  identical panels, composed of three planar trusses (Fig. 1). The quadrature circuit of the structure's rod has the shape of an isosceles triangle (Fig. 2).

The number of truss members is  $n_r = 9(n + 1)$ ; the number of joints is  $3(n + 1)$ . The total number of rods includes six support rods. Three members ensure the spherical support in joint  $A$ , two of them ensure the cylindrical support in joint  $B$ . Another support, a horizontally supported rod, is located in the upper belt of the structure. The truss has a statically determinate construction. The inertial properties of the structure are simulated by separate masses  $\mu$  located in all truss joints, except for supports  $A$  and  $B$ . Thus, the number of the degrees of freedom of the system is  $K = 3n + 1$ .

## MATERIALS AND METHODS

An analytical solution to the problem of the frequency spectrum of natural oscillations of systems having a large number of degrees of freedom will not be feasible because it is impossible to analytically identify the roots of algebraic equations in a degree higher than the fifth one. There are several methods that ensure an approximate solution to this problem; they can be

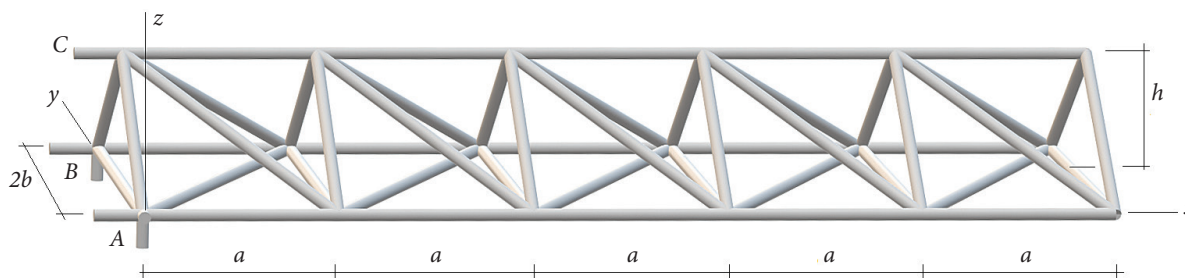


Fig. 1. Truss,  $n = 5$

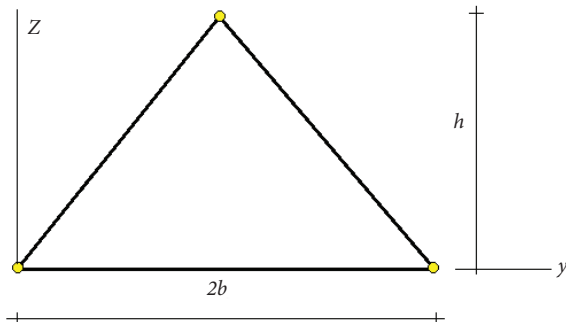


Fig. 2. The quadrature circuit of the truss

used to develop solutions in the form of finite formulas. The most suitable ones are the Dunkerley method and the Rayleigh method, which do not make it necessary to calculate all elements of the characteristic matrix. These methods require the values of diagonal elements, which can be obtained by solving the problem of vibration of individual loads applied to the joints having pre-set mass. However, the Dunkerley method offers a solution in the form of only a trace of the characteristic matrix. In the Rayleigh method, the mathematical component of the solution is somewhat more complex, although the accuracy of this method is much higher [24]. Let's consider a simpler Dunkerley method, used to identify the value of the first natural frequency of the bottom. The approximate value of Dunkerley frequency  $\omega_D$  is expressed through partial frequency  $\omega_p$  :

$$\omega_D = \sqrt{1 / \sum_{p=1}^K 1 / \omega_p^2}. \quad (1)$$

To calculate partial frequencies, we make a differential equation of displacement that encompasses mass  $\mu$ :

$$\mu \ddot{z}_p + d_p z_p = 0, \quad p = 1, \dots, K,$$

where  $d_p$  is the stiffness coefficient;  $z_p$  is the mass displacement, and  $\ddot{z}_p$  is the acceleration. Hence, the vibration frequency of a single load has the form:  $\omega_p = \sqrt{d_p / \mu}$ . The coefficient of rigidity is calculated using the Mohr integral:

$$\delta_p = 1/d_p = \sum_{j=1}^{n-6} (\tilde{S}_j^{(p)})^2 l_j / (EF). \quad (2)$$

Hence,  $\tilde{S}_j^{(p)}$  are the forces in the rod, where  $j$  comes from the action of a single vertical force applied to the joint where mass  $\mu$  with the  $p$  number is located,  $E$  is the Young's modulus of the member material,  $F$  is the cross-sectional area of the rods. The cross sections and the material of the members (except for the three supporting ones) are assumed to be the same. It is assumed that the six supporting members will not deform. Expressions (1), (2) are used to derive the following equation:

$$\omega_D^{-2} = \mu \sum_{p=1}^K \delta_p = \mu \Delta. \quad (3)$$

To determine the forces included into the Mohr integral (2) in the analytical form, we use the truss calculation software [1], compiled in the language of computer mathematics Maple. The software enters the coordinates of joints, the order of connection of hinges and rods, and compiles a matrix for the system of equations of the equilibrium of joints along three axes:  $x, y, z$ . The members and hinges of the truss are numbered (Fig. 3). The origin is located in spherical support  $A$ . Coordinates are entered in cycles with a parametrically defined length:

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i+n+1} = x_{i+2n+2} = a(i-1), \\ y_i &= 0, \quad y_{i+n+1} = 2b, \quad y_{i+2n+2} = b, \\ z_i &= z_{i+n+1} = 0, \quad z_{i+2n+2} = h, \quad i = 1, \dots, n+1. \end{aligned}$$

The structure of the lattice is based on the numbers of the ends of corresponding members by analogy to the method of discrete mathematics used to make graphs. Longitudinal members of lower and upper belts, for example, are represented as:

$$\begin{aligned} N_i &= [i, i+1], \quad N_{i+n} = [i+n+1, i+n+2], \\ N_{i+2n} &= [i+2n+2, i+2n+3]. \end{aligned}$$

Hence, the matrix for the system of equations of the equilibrium of joints is filled. Matrix elements are the guiding cosines of the forces arising in the members. The solution to the system generates the values of forces in the analytical form.

The analysis of trusses having a different number of panels  $n$  shows that each time value  $\Delta$  represents:

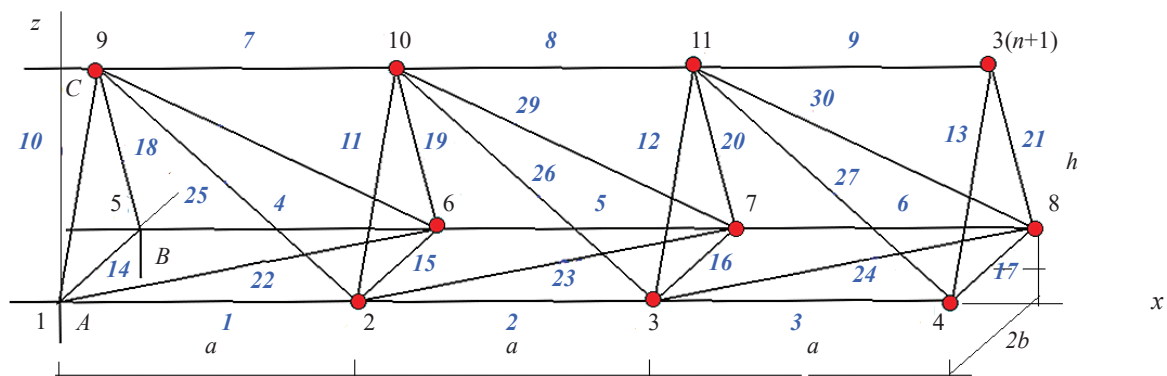


Fig. 3. Numbered joints and truss members if  $n = 3$ , and if joints and masses are highlighted

$$\Delta = \frac{(n+1)(C_1 a^3 + C_2 b^3 + C_3 c^3 + C_4 d^3 + C_5 f^3)}{EFh^2}, \quad (4)$$

where the lengths of braces are:

$$d = \sqrt{b^2 + h^2}, \quad c = \sqrt{a^2 + b^2 + h^2}, \quad f = \sqrt{a^2 + 4b^2}.$$

For a series of analytical solutions obtained for trusses with a sequentially increasing number of pan-

els, the coefficients in (4) are derived using the method of induction:

$$C_1 = n(3n^2 + n + 4)/8, \quad C_2 = (4n + 1)/2, \\ C_3 = 5n/4, \quad C_4 = (5n + 2)/4, \quad C_5 = n/4.$$

As a result, we have the following dependence of the first frequency on the size of the truss, the mass, and the number of panels:

$$\omega_D = 2h \sqrt{\frac{2EF}{\mu(n+1)(n(3n^2 + n + 4)a^3 + 4(4n + 1)b^3 + 10nc^3 + 2(5n + 2)d^3 + 2nf^3)}}. \quad (5)$$

### RESEARCH RESULTS

The numerical verification can be performed in any system designated for the analysis of building structures. As a rule, such systems use the finite element method to make calculations. The truss is statically determinate, the forces in its members can be calculated using the same software in which the analytical solution (5) was obtained by converting it to the numerical mode. You can also specify all the initial geometrical, material, and inertial parameters of a structure not as symbols or integers, but as decimal numbers. The Maple system will automatically calculate everything.

The solution to the problem of vibration of a system having many degrees of freedom is related to the eigenvalue problem. Here is a differential equation describing the dynamics of a system with a finite number of degrees of freedom:

$$M_K \ddot{Z} + D_K Z = 0, \quad (6)$$

Where  $Z$  is the displacement vector of the mass system,  $\ddot{Z}$  is the acceleration vector,  $D_K$  is the stiffness matrix, and  $K$  is the number of degrees of freedom. In the case of identical masses, inertia matrix  $M_K$  is diagonal:  $M_K = \mu I_k$ ,  $I_k$  is the unit matrix. For harmonic vibrations having frequency  $\omega$ , the replacement  $\ddot{Z} = -\omega^2 Z$  is valid. The matrix is the inverse of compliance matrix  $N$ , the elements of which are calculated using the Mohr integral:

$$b_{i,j} = \sum_{\alpha=1}^{n-6} S_{\alpha}^{(i)} S_{\alpha}^{(j)} l_{\alpha} / (EF),$$

where, by analogy with (2),  $S_{\alpha}^{(i)}$  is the force in member  $\alpha$  arising from the action of a single vertical force in joint  $i$ . Multiplying (6) by  $B_k$ , we obtain the eigenvalue problem:  $B_k Z = \lambda Z$ , where  $\lambda = 1/(\omega^2 \mu)$  are the eigenvalues of the matrix. Eigenvalues, a special operator, is used to determine the eigenvalue of a matrix in the Maple system.

### DISCUSSION AND CONCLUSIONS

We present the comparison of numerical and analytical methods. Consider a steel truss having mass  $\mu = 1000$  kg in the joint. We assume the modulus

of elasticity  $E = 2 \cdot 10^5$  MPa,  $F = 10.9$  sm<sup>2</sup>,  $a = 2$  m,  $h = b = 1$  m. In the graph (Fig. 4), the Dunkerley curve  $\omega_D$ , constructed according to formula (5), is located below the curve of the first frequency  $\omega_1$ , obtained nu-

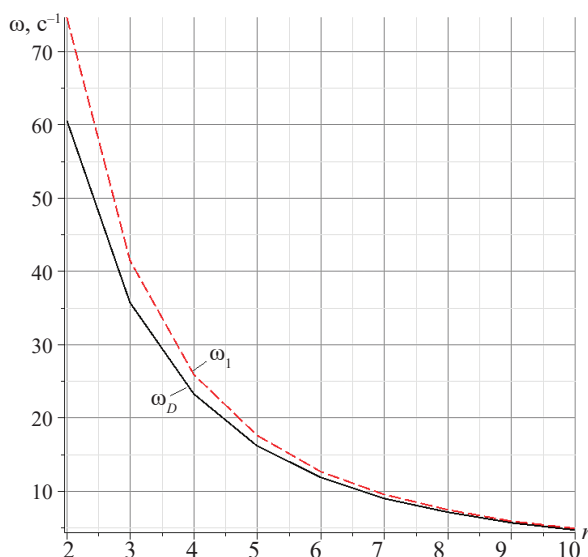


Fig. 4. Comparison with the frequency dependence on the number of panels obtained numerically

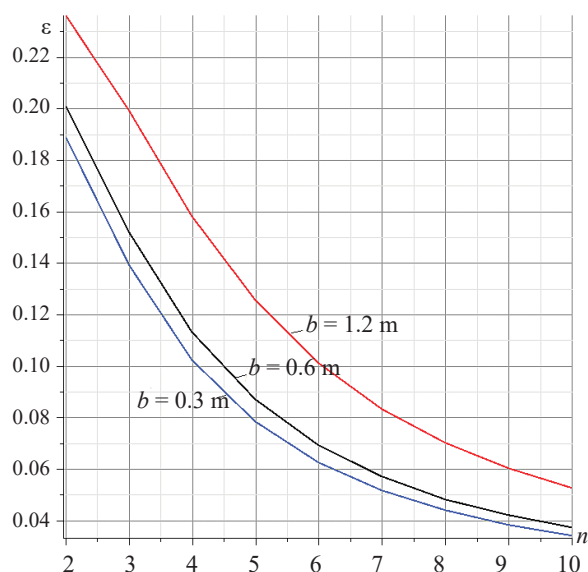


Fig. 5. Dependence of accuracy on the number of panels

merically. As the number of panels increases, these two solutions converge.

To estimate the error value, we enter value

$$\varepsilon = (\omega_1 - \omega_D) / \omega_1.$$

Fig. 5 shows the dependence of the error on the number for three values of the cantilever width. The accuracy increases quite rapidly along with the number of panels, approaching a quite acceptable error of a few percent. Thus, the value of the obtained analytical solution increases precisely in those cases when numerical solutions have the least accuracy due to the increase in the dimensions of the matrices used (the matrices of the system of equilibrium equations and the stiffness

$$\Delta = (n+1) \left( C_1 a^3 / \gamma_a + C_2 b^3 / \gamma_b + C_3 c^3 / \gamma_c + C_4 d^3 / \gamma_d + C_5 f^3 / \gamma_f \right) / (EF_0 h^2),$$

where the stiffness of rods is expressed in terms of reduced stiffness:  $EF_a = \gamma_a EF_0$ , ...,  $EF_f = \gamma_f EF_0$ .

The above algorithm used to derive the formula applied to identify the dependence of the natural vibration frequency on the number of panels shows that the result

matrix) with the inevitable accumulation of rounding errors. Increasing the width of truss  $b$  does not significantly reduce the accuracy of the lower value. The same pattern applies to dependence of accuracy on height  $h$ .

The spatial truss model having masses concentrated at the joints and a restriction imposed on the vertical displacement of masses is probably the simplest one, if we do not consider planar truss models. Another simplification of the accepted model, the equality of the stiffness of all members, is not essential. The obtained solution can be generalized by applying relative stiffness coefficients to individual groups of members having the same length. The formula (4) will be as follows:

has a compact form and a sufficiently high accuracy. An attempt to employ the Rayleigh method in a similar formulation using Maple transformations in the symbolic form shows that the final formula turns out to be cumbersome and not very convenient for use in practice.

## REFERENCES

1. Tinkov D.V. *Analytical solutions of problems on natural frequencies of oscillations of regular rod systems*: dissertation abstract candidate of technical sciences. Moscow, National Research University MPEI, 2019; 20. (rus.).
2. Vorobyev O. Bilateral analytical estimation of first frequency of a plane truss. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020; 92:9204. DOI: 10.18720/CUBS.92.4
3. 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
4. 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
5. Zok F.W., Latture R.M., Begley M.R. Periodic truss structures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2016; 96:184-203. DOI: 10.1016/j.jmps.2016.07.007
6. Kirsanov M. *Trussed Frames and Arches: Schemes and Formulas*. UK, Cambridge Scholars Publishing, 2020; 186.
7. Voropai R.A., Kazmiruk I.Yu. Analytical study of the horizontal stiffness of the flat statically determinate arch truss. *Bulletin of Scientific Conferences*. 2016; 2-1(6):10-12.
8. Voropai R.A. Analysis of the deflection of the regular truss with cross type lattice. *Science Almanac*. 2016; 4-3(18):238-240. DOI: 10.17117/na.2016.04.03.238 (rus.).
9. Shipaeva A.S. Calculation of the deflection of girder beam loaded on the bottom flange in the system Maple. *Science Almanac*. 2016; 5-3(19):236-239. DOI: 10.17117/na.2016.05.03.236 (rus.).
10. Kanatova M.I. Frequency equation and analysis of vibrations of a flat girder. *Trends in Applied Mechanics and Mechatronics*. 2015; 1:31-34. (rus.).
11. Kirsanov M.N., Tinkov D.V. Analysis of the natural frequencies of oscillations of a planar truss with an arbitrary number of panels. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(3):(126):284-292. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.284-292
12. Petrichenko E.A. The lower limit of the frequency of natural oscillations of the Fink truss. *Structural mechanics and structures*. 2020; 3(26):21-29.
13. Rybakov L.S., Mishustin I.V. Natural vibrations of plane regular elastic trusses of orthogonal structure. *Mechanics of composite materials and structures*. 1999; 5(2):3-16.
14. Rybakov L.S., Mishustin I.V. Application of the concentrated mass method to the analysis of natural elastic vibrations of one regular truss structure. *Mechanics of composite materials and structures*. 1999; 5(4):51-64.
15. Mishustin I.V., Rybakov L.S. Oscillations of plane elastic trusses of orthogonal structure. *Rigid body mechanics*. 2003; 2:168-184.
16. Kilikevičius A., Bačinskis D., Jurevičius M., Kilikevičienė K., Fursenko A., Jakaitis J. et al. Field testing and dynamic analysis of old continuous truss steel bridge. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2018; 13(1):54-66. DOI: 10.3846/bjrbe.2018.394

17. Bačinskas D., Turla V., Kilikevičius A., Ragauskas P., Jurevičius M. Dynamic testing of railway truss-bridge. *Journal of Vibroengineering*. 2014; 16(6):2649-2657.
18. Vaez S.R.H., Mehanpour H., Fathali M.A. Reliability assessment of truss structures with natural frequency constraints using metaheuristic algorithms. *Journal of Building Engineering*. 2020; 28:101065. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101065
19. Lieu Q.X., Do D.T.T., Lee J. An adaptive hybrid evolutionary firefly algorithm for shape and size optimization of truss structures with frequency constraints. *Computers & Structures*. 2018; 195:99-112. DOI: 10.1016/j.compstruc.2017.06.016
20. Pham H.A. Truss optimization with frequency constraints using enhanced differential evolution based on adaptive directional mutation and nearest neighbor comparison. *Advances in Engineering Software*. 2016; 102:142-154. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2016.10.004
21. Ufimtsev E., Voronina M. Research of total mechanical energy of steel roof truss during structurally nonlinear oscillations. *Procedia Engineering*. 2016; 150:1891-1897. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.188
22. Chen J., Zhang W., Zhang Y.F. Equivalent continuum model and nonlinear breathing vibrations of rotating circular truss antenna subjected to thermal excitation. *Thin-Walled Structures*. 2020; 157:107127. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107127
23. Liu M., Cao D., Zhang X., Wei J., Zhu D. Nonlinear dynamic responses of beamlike truss based on the equivalent nonlinear beam model. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021; 194:106197. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106197
24. Bachmann H. *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*. Birkhäuser Verlag, Basel, 1995; 234.

Received February 18, 2021.

Adopted in revised form on April 29, 2021.

Approved for publication on April 29, 2021

**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: FfoNG-FwAAAAJ, IстинаResearcherID: 2939132; C216@ya.ru;

**Oleg V. Vorobyev** — postgraduate student 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; ID RISC: 1091660, ORCID: 0000-0002-5220-1264; olvarg@mail.ru.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тиньков Д.В. Аналитические решения задач о собственных частотах колебаний регулярных стержневых систем : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : НИУ МЭИ, 2019. 20 с.
2. Vorobev O. Bilateral analytical estimation of first frequency of a plane truss // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020. Vol. 92. Article № 9204. DOI: 10.18720/CUBS.92.4
3. 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
4. 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
5. Zok F.W., Latture R.M., Begley M.R. Periodic truss structures // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2016. Vol. 96. Pp. 184–203. DOI: 10.1016/j.jmps.2016.07.007
6. Kirsanov M. Trussed frames and arches: Schemes and formulas. UK : Cambridge Scholars Publishing, 2020. 186 p.
7. Voropai R.A., Kazmiruk I.Yu. Analytical study of the horizontal stiffness of the flat statically determinate arch truss // *Bulletin of Scientific Conferences*. 2016. № 2–1 (6). Pp. 10–12.
8. Воронай П.А. Анализ прогиба регулярной фермы с крестообразной решеткой // Научный альманах. 2016. № 4–3 (18). С. 238–240. DOI: 10.17117/na.2016.04.03.238
9. Шумаева А.С. Расчет прогиба балочной фермы, нагруженной по нижнему поясу в системе Maple // Научный альманах. 2016. № 5–3 (19). С. 236–239. DOI: 10.17117/na.2016.05.03.236
10. Канатова М.И. Частотное уравнение и анализ колебаний плоской балочной фермы // *Trends in Applied Mechanics and Mechatronics*. 2015. С. 31–34.
11. Kirsanov M.N., Tinkov D.V. Analysis of the natural frequencies of oscillations of a planar truss with an arbitrary number of panels // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 3 (126). С. 284–292. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.284-292
12. Петриченко Е.А. Нижняя граница частоты собственных колебаний фермы Финка // *Строительная механика и конструкции*. 2020. № 3 (26). С. 21–29.

13. Рыбаков Л.С., Мишустин И.В. Собственные колебания плоских регулярных упругих ферм ортогональной структуры // Механика композиционных материалов и конструкций. 1999. Т. 5. № 2. С. 3–16.

14. Рыбаков Л.С., Мишустин И.В. Применение метода сосредоточенных масс к анализу собственных упругих колебаний одной регулярной ферменной структуры // Механика композиционных материалов и конструкций. 1999. Т. 5. № 4. С. 51–64.

15. Мишустин И.В., Рыбаков Л.С. Колебания плоских упругих ферм ортогональной структуры // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2003. № 2. С. 168–184.

16. Kilikevičius A., Vačinskas D., Jurevičius M., Kilikevičiene K., Fursenko A., Jakaitis J. et al. Field testing and dynamic analysis of old continuous truss steel bridge // Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 2018. Vol. 13. Issue 1. Pp. 54–66. DOI: 10.3846/bjrbe.2018.394

17. Vačinskas D., Turla V., Kilikevičius A., Ragauskas P., Jurevičius M. Dynamic testing of railway truss-bridge // Journal of Vibroengineering. 2014. Vol. 16. Issue 6. Pp. 2649–2657.

18. Vaez S.R.H., Mehanpour H., Fathali M.A. Reliability assessment of truss structures with natural frequency constraints using metaheuristic algorithms // Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 28. P. 101065. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.101065

19. Lieu Q.X., Do D.T.T., Lee J. An adaptive hybrid evolutionary firefly algorithm for shape and size optimization of truss structures with frequency constraints // Computers & Structures. 2018. Vol. 195. Pp. 99–112. DOI: 10.1016/j.compstruc.2017.06.016

20. Pham H.A. Truss optimization with frequency constraints using enhanced differential evolution based on adaptive directional mutation and nearest neighbor comparison // Advances in Engineering Software. 2016. Vol. 102. Pp. 142–154. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2016.10.004

21. Ufimtsev E., Voronina M. Research of total mechanical energy of steel roof truss during structurally nonlinear oscillations // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 1891–1897. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.188

22. Chen J., Zhang W., Zhang Y.F. Equivalent continuum model and nonlinear breathing vibrations of rotating circular truss antenna subjected to thermal excitation // Thin-Walled Structures. 2020. Vol. 157. P. 107127. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107127

23. Liu M., Cao D., Zhang X., Wei J., Zhu D. Nonlinear dynamic responses of beamlike truss based on the equivalent nonlinear beam model // International Journal of Mechanical Sciences. 2021. Vol. 194. P. 106197. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106197

24. Bachmann H. Vibration problems in structures: Practical guidelines. Birkhäuser Verlag, Basel, 1995. 234 p.

Поступила в редакцию 18 февраля 2021 г.

Принята в доработанном виде 29 апреля 2021 г.

Одобрена для публикации 29 апреля 2021 г.

**О Б А В Т О Р А Х:** **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;

**Олег Владимирович Воробьев** — аспирант кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин; **Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»);** 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; РИНЦ ID: 1091660, ORCID: 0000-0002-5220-1264; olvarg@mail.ru.

## Решение задачи устойчивости тонкостенных стальных цилиндрических оболочек

С.В. Черемных, С.А. Соколов

Тверской государственный технический университет (ТвГТУ); г. Тверь, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Применение тонкостенных цилиндрических оболочек в качестве элементов высоконагруженных изделий строительной и машиностроительной отраслей требует совершенствования методов расчета предельных состояний при работе оболочки в упругопластической области.

**Материалы и методы.** Изучена проблема устойчивости круговой тонкостенной цилиндрической оболочки из стали 45 в соответствии с ГОСТ 1050-2013, воспринимающей нагрузку от чистого сжатия и осевого кручения. При этом проанализирована экспериментальная и теоретическая часть задачи. По результатам работы на экспериментальном комплексе СН-ЭВМ рассмотрена опытная проверка достоверности различных вариантов теории пластичности, используемых в решении вопросов устойчивости оболочки за пределом упругости. Отмечается, что определение критерия потери устойчивости при комбинированном нагружении исходя из экспериментальных зависимостей в решенных ранее задачах отсутствует. Результаты приведенного эксперимента использованы для сравнения с результатами теоретического исследования. Расчеты на устойчивость оболочки при сложном докритическом процессе нагружения строятся на основе теории устойчивости А.А. Ильюшина, в которой функции пластичности приняты согласно аппроксимациям В.Г. Зубчанинова.

**Результаты.** Решение выполнено в авторской программе для решения задачи бифуркации цилиндрической оболочки с учетом сложного характера деформирования в момент потери устойчивости при сложном докритическом нагружении для пропорциональных процессов и для траектории в виде дуг окружностей. Доказано, что предложенная методика расчета и используемые аппроксимации описывают реальное напряженно-деформируемое состояние в оболочках малой гибкости для рассмотренной траектории сложного деформирования и характеризуют устойчивое состояние материала за пределом упругости.

**Выводы.** Выполненный теоретический расчет на прочность и деформативность цилиндрической оболочки и экспериментальные исследования по установлению достоверности полученных результатов показали их хорошее соответствие. Это позволит совершенствовать процесс проектирования элементов конструкций, выполняемых из материалов со сложными механическими свойствами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** устойчивость, цилиндрическая оболочка, сложное нагружение, диаграммы деформирования, бифуркационная нагрузка, функции пластичности, аппроксимации

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Черемных С.В., Соколов С.А. Решение задачи устойчивости тонкостенных стальных цилиндрических оболочек // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 5. С. 577–586. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.577-586

## A solution to the problem of stability of thin-walled steel cylindrical shells

Stepan V. Cheremnykh, Sergei A. Sokolov

Tver State Technical University (TvSTU); Tver, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** It is necessary to improve methods of analysis of the limit states, occurring when a thin-walled shell is in the elastoplastic domain, to use these cylindrical shells as elements of heavily loaded products of construction and machine building industries.

**Materials and methods.** The problem of stability of a circular thin-walled cylindrical shell, made of steel 45 GOST 1050-2013, that takes the load induced by pure compression and axial torsion, has been studied. Besides, experimental and theoretical components of the problem have been analyzed. Experimental facility SN-EVM was applied to perform an experiment test and analyze its findings in terms of different versions of the theory of plasticity used to solve shell stability problems beyond the elastic limit. The co-authors emphasize the unavailability of any definition of the criterion of stability loss under combined loading based on experimental dependences that were identified earlier. The results of the experiment were compared with the results of the theoretical study. The analysis of the shell stability in the case of complex subcritical loading are based on the A.A. Ilyushin theory of stability, in which plasticity functions are taken according to V.G. Zubchaninov's approximations.

**Results.** The problem was solved using the software programme, developed by the co-authors. The software solves the bifurcation problem of a cylindrical shell with regard for the complex nature of deformations at the moment of stability loss in the case of exposure to complex subcritical loading, commensurable processes and the trajectory that has the form of circular arcs. It has been shown that the proposed method of analysis and approximations describe the real stress-strain state

of shells that feature low flexibility in respect of a complex pattern of deformation and characterize a stable state of the material beyond the elastic limit.

**Conclusions.** The theoretical strength and deformability analysis of a cylindrical shell and its experimental studies demonstrate sufficient convergence which proves their reliability. This conclusion will allow to improve the process of design of structural elements made of materials that have complex mechanical properties.

**KEYWORDS:** stability, cylindrical shell, complex loading, deformation diagrams, bifurcation load, plasticity functions, approximations

**FOR CITATION:** Cheremnykh S.V., Sokolov S.A. A solution to the problem of stability of thin-walled steel cylindrical shells. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(5):577-586. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.577-586 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространенных сечений в современном строительстве является трубчатое сечение. К таким сечениям могут относиться: стальные электросварные прямошовные трубы, выполненные по ГОСТ 10704-91; трубы стальные бесшовные и сварные холоднодеформированные общего назначения по ГОСТ 32678-2014; трубы стальные водогазопроводные согласно ГОСТ 3262-75 и трубы стальные сварные для строительных конструкций по ГОСТ Р 58064-2018. Принятые в данных государственных стандартах сечения служат для различного рода использования, а наряду с разнообразием сечений трубчатые образцы также имеют различные свойства и состав материалов, из которых они изготовлены [1–9]. В основном круглые сечения применяются на объектах нефтегазовой, химической промышленности, авиастроении и машиностроении.

В учебных и научных целях для изучения сечений круглой формы в настоящее время используются образцы, выполненные в виде тонкостенных цилиндрических оболочек из различных, в то же время распространенных сталей, таких как марки сталей Ст3кп, Ст4пс, Ст5сп, относящиеся по ГОСТ 380-2005 к углеродистым сталям обыкновенного качества. В свою очередь, стоит отметить, что применение именно тонкостенных оболочек позволяет раскрыть весь потенциал круглого замкнутого сечения, исследовать его поведение при различных нагрузках и воздействиях, систематизировать полученные решения и сделать определяющие выводы о данных материалах для развития современной строительной механики и механики деформируемого твердого тела в целом [10–17].

Применение тонкостенных цилиндрических оболочек в качестве элементов высоконагруженных изделий требует совершенствования расчетов оболочек при упругопластическом состоянии материала на основе метода конечных элементов. Оболочки зачастую работают в условиях сложного нагружения и пластического деформирования. Использование неупругих моделей поведения материала при определении коэффициентов запаса прочности и устойчивости позволяет снизить материалоемкость конструкции, сохраняя ее основные эксплуатационные характеристики. Это необходимо, так как стремление к снижению массы должно быть обосновано результатами расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) элемента.

Потеря устойчивости является одним из наиболее важных предельных состояний оболочки. Ключевые теоретические положения и экспериментальные результаты в области устойчивости оболочек за пределом упругости получены в основном для условий «простого» нагружения. Этому посвящен ряд работ, опубликованных как в отечественной, так и зарубежной научно-технической литературе, наиболее известные из которых публикации А.А. Ильюшина, В.Г. Зубчанинова и их учеников [18–21].

Переход к «сложному» нагружению требует исследования возможностей различных вариантов теории пластичности прогнозировать момент потери устойчивости цилиндрической оболочки.

Определенные критерии потери устойчивости за пределом упругости были сформулированы в работах В.Г. Зубчанинова [18, 22] на основе представления теории процессов. Однако критические оценки точности решений, полученных на основе применения различных соотношений и моделей теории пластичности, отсутствуют. Поэтому исследования, посвященные точности потери устойчивости и сравнению нескольких теоретических моделей пластичности, применяемых при оценке устойчивости цилиндрических оболочек при сложном нагружении за пределом упругости, следует считать актуальными [20].

Результаты, представленные в статье, позволяют с достаточной степенью точности для заданного сечения и траектории нагружения цилиндрической тонкостенной оболочки определить потерю устойчивости материала за пределом упругости, при этом правильность расчета обосновывается экспериментально.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Экспериментальная часть

Эксперименты и исследования с нагружением тонкостенных цилиндрических оболочек осевой сжимающей силой, кручением и внутренним давлением до потери устойчивости стали первым шагом в опытной проверке достоверности различных вариантов теории пластичности, используемых в решении задач устойчивости оболочек за пределом упругости.

Наиболее подробно экспериментальная потеря устойчивости при сложном нагружении изучена В.Г. Зубчаниновым и соавторами на эксперимен-

тальном комплексе СН-ЭВМ [23–25]. Вместе с тем определение критерия потери устойчивости при комбинированном нагружении, исходя из экспериментальных зависимостей в решенных задачах, отсутствует.

Для определения потери устойчивости оболочек экспериментально рассмотрим процесс трехэтапного нагружения оболочки в соответствии с рис. 1, где проекция вектора деформаций  $\mathcal{E}_1$  соответствует нагружению образца осевой силой растяжения при положительном направлении траектории деформирования (+1) и нагружению образца осевой сжимающей силой при отрицательном направлении траектории деформирования (–1). Проекция вектора деформаций  $\mathcal{E}_3$  соответствует нагружению образца крутящим моментом. Стрелками обозначено направление трехэтапного нагружения. Треугольником здесь и на последующих рисунках будет отмечена экспериментальная потеря устойчивости образца.

Согласно рис. 1, на первом этапе (отрезок  $A-B$ ) выполняется растяжение материала, далее (кривая  $B-C$ ) — один полный оборот с четвертью траектории постоянной кривизны при одновременном нагружении оболочек осевой силой и крутящим моментом и сжатие образца (отрезок  $C-D$ ) до потери устойчивости. На участке  $B-C$  величина модуля вектора деформаций является постоянной величиной. 1,25 оборота на втором участке выполнено для того, чтобы от чистого растяжения оболочки на первом участке  $A-B$  перейти к третьему участку  $C-D$ , сжатие оболочки при постоянном уровне деформации, вызванной крутящим моментом величиной в 1 %, и довести оболочку до потери устойчивости, чтобы впоследствии оценить влияние истории нагружения образца на критические параметры устойчивости.

Эксперимент выполнялся на экспериментальном комплексе СН-ЭВМ на кафедре сопротивления материалов, теории упругости и пластичности Тверского государственного технического университета. Данный комплекс способен реализовывать сложное

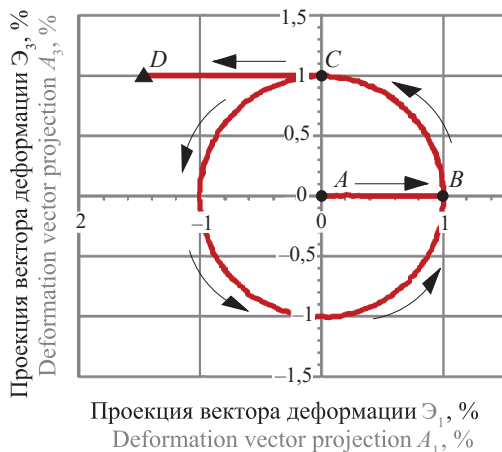


Рис. 1. Траектория деформирования оболочки из стали 45  
Fig. 1. Local deformation diagrams  $\mathcal{E}_1 - S$

трехпараметрическое нагружение тонкостенных оболочек осевой силой, крутящим моментом и внутренним давлением. Нагружение выполняется в полном соответствии с заданной траекторией деформирования. Подробно комплекс и его работа описываются в публикации [25].

В качестве образцов для испытаний использовались тонкостенные трубки из стали 45 ГОСТ 1050-2013. Тонкостенные трубчатые образцы имели толщину стенки  $h = 1$  мм, радиус срединной поверхности  $R = 15$  мм, длину рабочей части  $L = 90$  мм. Температура материала мало отличалась от средней температуры окружающей среды, которая составляла  $20$  °С. Модуль сдвига материала принимается равным  $G = 78 \cdot 10^3$  МПа согласно ГОСТ 4543-2016, модуль упругости стали  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа, предел текучести  $\sigma_T = 323$  МПа, временное сопротивление  $\sigma_B = 590$  МПа.

Если в представленной на рис. 1 траектории деформирования, где положение каждой точки в соответствии с теорией сложного НДС определяется тремя компонентами вектора деформаций  $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$  по заданным деформациям, определить компоненты вектора напряжений  $S_1 - S_3$ , то можно построить траекторию нагружения материала, которая называется откликом траектории деформирования в пространстве напряжений.

На рис. 2 в пространстве напряжений представлен отклик на реализованную траекторию деформирования — траекторию напряжений.

По результатам эксперимента на рис. 3 показана диаграмма деформирования материала при комбинированном нагружении в соответствии с представленной на рис. 1 траекторией деформирования. Принятые значения модуля сдвига полностью соответствуют линейно-упругому участку экспериментальной диаграммы деформирования.

На рис. 4 представлена диаграмма деформирования материала при комбинированном нагружении в зависимости от длины дуги траектории  $S$ . Поскольку длина дуги траектории постоянно растет,

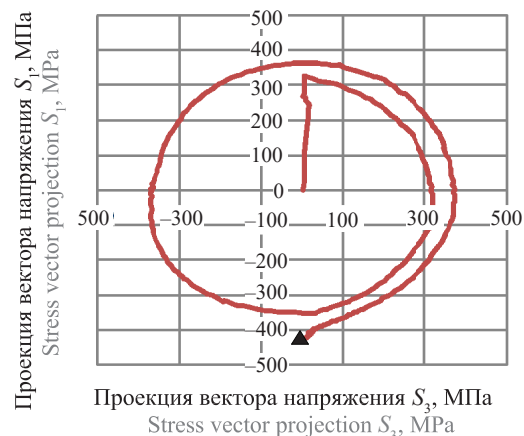


Рис. 2. Траектория напряжений оболочки из стали 45  
Fig. 2. The trajectory of stresses in a shell made of Steel 45

в отличие от модуля деформаций, который на траектории постоянной кривизны остается неизменным, то, начиная с 1 % и заканчивая 9 %, мы получаем колебательный характер графика, соответствующий участку траектории постоянной кривизны, участку  $B-C$  на рис. 1. Кроме этого, из представленной диаграммы видно, что точка  $B$  находится за пределом текучести, и на всем участке траектории постоянной кривизны (участок  $B-C$ ), а также на участке последующего сжатия (участок  $C-D$ ) сталь работает пластически.

Как видим, график на рис. 4 имеет неравномерный характер, отличный от универсальных зависимостей. Также стоит отметить, что после излома траектории имеет место «нырок» модуля вектора напряжений. «Нырок» возникает в точке, где происходит излом траектории деформирования (точка  $B$  на рис. 1), в которой траектория имеет излом на 90 градусов. При этом по одному из компонент напряжений происходит разгрузка и, как результат, имеет место так называемый нырок напряжений. Продольная сила уменьшается, идет разгрузка по компоненте  $\mathcal{E}_1$ , но при этом по компоненте  $\mathcal{E}_3$  отмечается активное деформирование. Именно соотношение этих двух факторов определяет, идет ли активное деформирование или реализуется разгрузка. После излома происходит частичная разгрузка материала вплоть до низа нырка напряжений, а затем начинается новый этап активного пластического деформирования.

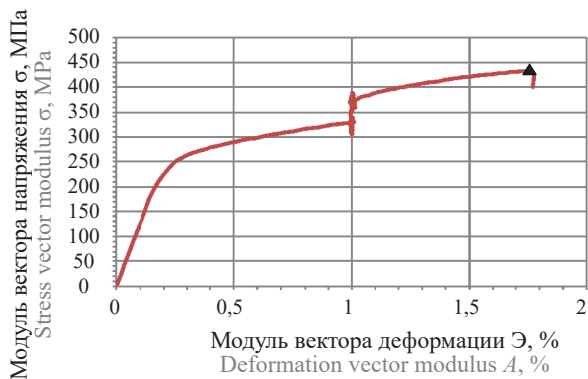


Рис. 3. Диаграмма деформирования материала из стали 45  
Fig. 3. The deformation diagram for the material made of Steel 45

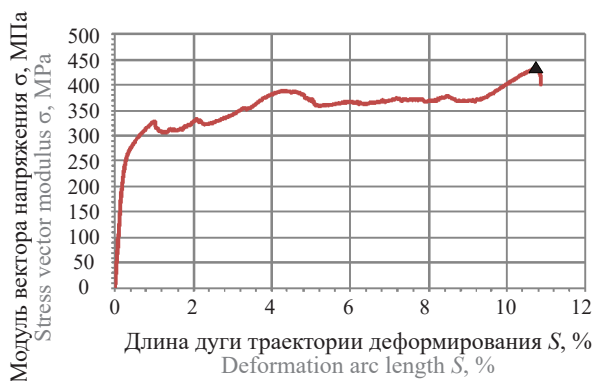


Рис. 4. Диаграмма деформирования материала из стали 45  
Fig. 4. The deformation diagram for the material made of Steel 45

Визуально потеря устойчивости при эксперименте оценивается по внезапному изменению формы образца с образованием выпучин и вмятин на поверхности оболочки, что обуславливает резкое изменение угла закручивания и/или сближение его торцов (рис. 5).

При графическом и числовом анализе экспериментальных результатов момент потери устойчивости определяется отклонением траектории деформации от заданной программы эксперимента, что численно характеризуется быстрым изменением величины производных от компонент вектора деформаций  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_3$ , по монотонно возрастающему параметру нагружения — длине дуги  $S$  — траектории деформации. На рис. 6, 7 представлены локальные диаграммы деформаций, построенные по результатам экспериментальных данных.

Обработка экспериментальных данных процессов сложного нагружения и деформирования материалов подразумевает получение на основе используемых соотношений теории пластичности зависимостей для функций, определяющих векторные и скалярные свойства материалов, и построение на основании этих зависимостей экспериментальных графиков. Получить универсальные уравнения для обработки экспериментальных данных, которые были бы применимы к произвольным траекториям сложного нагружения и деформирования, невозможно. Это происходит потому, что, на-



Рис. 5. Образцы оболочек из стали 45 до испытаний (слева) и после испытаний (справа)

Fig. 5. Samples of Steel 45 shells before (left) and after testing (right)



Рис. 6. Локальная диаграмма деформирования  $\mathcal{E}_1 - S$   
Fig. 6. Local deformation diagrams  $\mathcal{E}_1 - S$

пример, векторные свойства материалов при постановке экспериментов в пространствах напряжений и деформаций характеризуют различные функции. Количество используемых в различных определяющих соотношениях функций пластичности и их физическая суть также различаются. Кроме того, уравнение для обработки экспериментальных сведений, как правило, имеет полуаналитический характер, что ставит их в зависимость от класса конкретной реализованной траектории и точности ее задания [26–28].

### Расчетная часть

Определение предельных параметров цилиндрической оболочки за пределом упругости требует исследования возможностей различных вариантов теории пластичности прогнозировать момент потери устойчивости материала. Для этого результаты приведенного выше эксперимента были использованы для сравнения с результатами теоретического исследования.

Для решения теоретической задачи устойчивости оболочку отнесем к длинной, так как выполняется условие  $L/R \geq \sqrt{R/h}$ . Влияние закрепления сказывается только вблизи концов рабочей части оболочки в зоне краевого эффекта. Длина этого участка имеет порядок  $2,5\sqrt{Rh}$ , что составляет не более 10 мм с каждого конца оболочки. Следовательно, в расчетах испытанные образцы можно рассматривать без учета влияния закрепления торцов.

Используется условие несжимаемости материала, что соответствует равенству нулю объемной деформации, а модуль объемной деформации  $K$  в этом случае  $K = \infty$ .

Представленные ниже уравнения и результаты выполнены на основании расчета нагрузок бифуркации с учетом сложного характера деформирования в момент потери устойчивости, в которых функции пластичности  $N$  и  $d\sigma/dS$  приняты согласно аппроксимациям В.Г. Зубчанинова [18].

Расчеты на устойчивость оболочки при сложном докритическом процессе на каждом этапе деформирования включают расчет исходных параметров (углов излома траектории, функций пластичности

и компонент напряженного состояния) и решение задачи устойчивости, строящееся на основе теории устойчивости А.А. Ильюшина с учетом разгрузки в момент потери устойчивости.

Для сложного докритического процесса связь напряжений и деформаций принимаем в виде [18]:

$$\dot{S}_{ij} = N \dot{\mathcal{E}}_{ij} + (\sigma' - N\tau) \dot{S} \frac{S_{ij}}{\sigma}, \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (1)$$

где  $\sigma' = d\sigma/dS = P\tau$ ;  $\tau = \cos \vartheta_1$ ;  $\mathcal{E}_{ij} = e_{ij}$ ;  $S_{ij}$  — компоненты тензора-девиатора напряжений;  $\mathcal{E}_{ij}$  — компоненты тензора-девиатора деформаций. Здесь  $d\sigma/dS$ ,  $N$  — определяющие функции пластичности, зависящие от параметров внутренней геометрии траектории деформирования,  $\vartheta_1$  — угол сближения. Значение компонент формулы (1) с точкой наверху означает дифференцирование функции по времени  $d/dt = d/dS \cdot dS/dt$ .

При определении функции  $N$  и  $d\sigma/dS$  воспользуемся аппроксимациями В.Г. Зубчанинова [18]:

$$N = 2G_p + [2G - 2G_p] \left( \frac{1 - \cos \vartheta_1}{2} \right)^q; \quad (2)$$

$$\frac{d\sigma}{dS} = 2G_k - [2G + 2G_k] \left( \frac{1 - \cos \vartheta_1}{2} \right)^p,$$

где  $G$ ,  $G_k$ ,  $G_p$  — модуль сдвига, касательный и секущий модули сдвига материала;  $p$ ,  $q$  — материальные параметры аппроксимации, определяемые из экспериментов по плоскому вееру двузвенных траекторий.

Для определения угла сближения  $\vartheta_1$ , который характеризует отклонение вектора  $\sigma$  от касательной к траектории деформирования в каждой ее точке и отражает влияние векторных свойств материала на процесс деформирования:

$$\vartheta_1 = - \left( \frac{\sigma \sin \vartheta_1}{N} - \chi_1 \right), \quad (3)$$

где  $\sigma$  — модуль вектора напряжений;  $\chi_1$  — кривизна траектории.

Равенства (1) и (3) решаются методом Рунге – Кутты. За параметр обобщенного времени  $t$  принимаются различные монотонно возрастающие параметры процесса, которые принимают вид [18]:

$$\begin{cases} -\sigma K^* i^2 / (g_1 E) + i \Omega_1^{**} / (2g_1 S^*) = \lambda_m^2 [\theta + 3K^* (\Omega_2^{**} - \Omega_1^{**} N_2^* / N_1^*) / (4g_1)], \\ e = -2i / (S^* \lambda_m^2) - (\theta_1 \Omega_1^{**} + N_2^* K^*) / N_1^*, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$K^* = \sigma_{11}^* + \sigma_{22}^* r^2 - 2\sigma_{12}^* r, \quad S^* = S_{11}^* r^2 + S_{22}^* + 2S_{12}^* r, \quad \sigma_{ij}^* = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma}, \quad S_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{\sigma}, \quad r = \frac{n}{\lambda_m},$$

$$g_1 = \frac{D_1}{D} = \frac{3}{2} \left( N_3^* - \frac{N_2^{*2}}{N_1^*} \right), \quad \theta = (1+r^2)^2 - K^2/2, \quad \theta_1 = 2(1+r^2)^2 / (3S_3^*) - 1, \quad (5)$$

$$2GN_m^* = \int_{-1}^1 N(z^*)^{m-1} dz^*, \quad 2G\Omega_m^{**} = \int_{-1}^1 \sigma' \dot{S}^* (z^*)^{m-1} dz^*, \quad z^* = z/h,$$

где  $i = 3R/h$  — гибкость оболочки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение данной задачи выполнено в разработанной авторами «Программе для решения задачи бифуркации цилиндрической оболочки с учетом сложного характера деформирования в момент потери устойчивости при сложном докритическом нагружении для пропорциональных процессов и для траектории в виде дуг окружностей» [25].

На рис. 8 и 9 показаны кривые наименьших гибкостей оболочки для соответствующих сложных докритических процессов, построенные на основе теории устойчивости А.А. Ильюшина [19].

Цифрами на графиках (рис. 8, 9) отмечены расчеты: 1 — с учетом сложного характера нагружения при  $p = 0,55$  и  $q = 1,35$ ; 2 —  $p = 0,60$  и  $q = 1,35$  (материальные параметры принимались при построении образа процесса нагружения); 3 —  $p = 0,70$  и  $q = 1,35$ ; 4 —  $p = 1,00$  и  $q = 1,00$ .

В решении показатели степеней  $p$  и  $q$  формулы (2) находились методом последовательного изменения их числовых значений так, чтобы результат расчета был наиболее близким к эксперименту. В результате вычислений можно получить точное значение, соответствующее пересечению экспериментальной точки потери устойчивости (отмечено на рис. 8 и 9 треугольником) и расчетной кривой, характеризующее устойчивое состояние цилиндрической оболочки за пределом упругости.

Сопоставление опытных и теоретических значений позволяет сделать вывод о том, что предложенная методика расчета и используемые аппроксимации описывают реальное НДС в оболочках малой гибкости для рассмотренной траектории сложного деформирования. Критические параметры напряжений и деформаций, наиболее верно отвечающие экспериментальной точке, соответствуют кривой 2 (рис. 8, 9) и составляют  $p = 0,60$  и  $q = 1,35$ . Данное решение значительно отличается от универсальных решений, полученных в работах Н.Л. Охлопковым и В.Г. Зубчаниновым, где значения материальных параметров принимались универсальными при  $p = q = 1,00$ . В этом случае функция зависимости деформаций и напря-

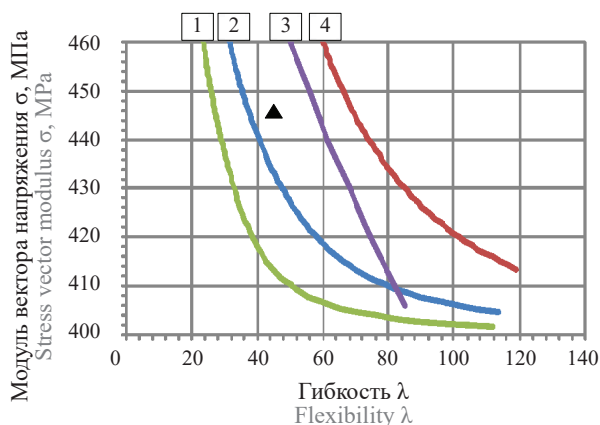


Рис. 8. Значения критических напряжений

Fig. 8. Values of critical stresses

жений от критических гибкостей имела бы несоответствие более 20 %. Так же из графиков (рис. 8, 9) можно отметить, что влияние параметра  $p$  на значения критических напряжений и деформаций выражается в большей мере, чем поправка значения  $q$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проблема исследования устойчивости за пределом упругости связана с двумя моментами. Как известно, одной из трудных проблем в механике деформируемого твердого тела является проблема построения определяющих соотношений за пределом упругости при сложном процессе нагружения. Если отбросить чисто математические вопросы, то для описания потери устойчивости за пределом упругости имеются две проблемы. Первая — правильно определить НДС до потери устойчивости. Вторая — построить правильно соотношения, определяющие связь между приращениями тензора деформаций с приращением тензора напряжений. Квалификация механика определяется, прежде всего, умением отбросить все второстепенное и сделать исследование максимально простым. Математическая сложность постановки не является самоцелью, и математическое исследование, по возможности, должно быть максимально простым [29, 30].

Выбрав за основу гипотезу компланарности А.А. Ильюшина, аппроксимации В.Г. Зубчанинова, функции пластичности и концепцию упругопластической устойчивости В.Г. Зубчанинова, можно провести исследование указанной проблемы для конкретных конструкций. Методы расчета на прочность и деформативность конструкционных материалов и изделий, а также методы экспериментальных исследований этих материалов по установлению достоверности полученных результатов позволят совершенствовать процесс проектирования элементов конструкций, выполняемых из материалов со сложными механическими свойствами.

Так, например, для трубопроводов, относящихся к типу больших сложных систем, управление функционированием невозможно без использования

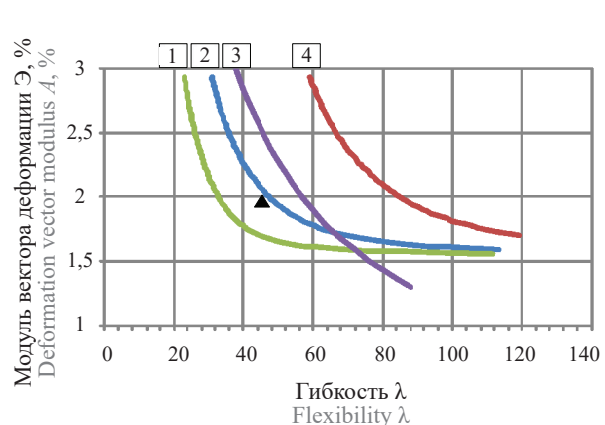


Рис. 9. Значения критических деформаций

Fig. 9. Values of critical deformations

различных видов моделей. При этом весьма существенно то, что модель трубопроводного транспорта обладает рядом таких специфических особенностей, как сложность структуры элементов и большое количество переменных, влияющих на показатели динамики. А неполнота текущей информации о поведении материала при том или ином способе воздействия на материал лишь усугубляет проблему. Поэтому полученные в работе экспериментальные результаты о процессах потери устойчивости стальных тонкостенных цилиндрических оболочек постоянной толщины при процессах докритического растяжения, кручения, а также воздействия внутреннего давления на материал актуальны и представля-

ют практический интерес организации при моделировании технологических процессов транспорта газа в магистральных трубопроводах.

Результаты экспериментальных исследований и приведенные в статье расчеты могут вызывать интерес для специалистов, занимающихся разработкой моделей пластичности, ресурса и надежности конструкций. Они могут быть применены для тестирования как отечественных, так и зарубежных программных комплексов, предназначенных для решения задач устойчивости тонкостенных конструкций, работающих за пределом упругости [25].

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Semenyuk N.P., Trach V.M., Podvornyi A.V.* Spatial stability of layered anisotropic cylindrical shells under compressive loads // *International Applied Mechanics*. 2019. Vol. 55. No. 2. Pp. 211–221. DOI: 10.1007/s10778-019-00951-5
2. *Mikilyan M., Marzocca P.* Vibration and stability of coaxial cylindrical shells with a gap partially filled with liquid // *Journal of Aerospace Engineering*. 2019. Vol. 32. No. 6. P. 06019006. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001077
3. *Olevskiy V., Olevska Y.* Mathematical model of elastic closed flexible shells with nonlocal shape deviations // *Journal of Geometry and Symmetry in Physics*. 2018. Vol. 50. Pp. 57–69. DOI: 10.7546/jgsp-50-2018-57-69
4. *Trinh M.C., Kim S.E.* Nonlinear stability of moderately thick functionally graded sandwich shells with double curvature in thermal environment // *Aerospace Science and Technology*. 2019. Vol. 84. Pp. 672–685. DOI: 10.1016/j.ast.2018.09.018
5. *Bakulin V.N., Konopelchev M.A., Nedbay A.Ya.* Aeroelastic stability of a cylindrical shell of linearly varying thickness // *Doklady Physics*. 2019. Vol. 64. No. 9. Pp. 360–364. DOI: 10.1134/S1028335819090015
6. *Zippo A., Barbieri M., Pellicano F.* Temperature gradient effect on dynamic properties of a polymeric circular cylindrical shell // *Composite Structures*. 2019. Vol. 216. Pp. 301–314. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.02.098
7. *Duc N.D., Thiem H.T.* Dynamic analysis of imperfect FGM circular cylindrical shells reinforced by fgm stiffener system using third order shear deformation theory in term of displacement components // *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2017. Vol. 14. No. 13. Pp. 2534–2570. DOI: 10.1590/1679-78253516
8. *Wagner H.N.R., Hühne C., Khakimova R.* Towards robust knockdown factors for the design of conical shells under axial compression // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018. Vol. 146–147. Pp. 60–80. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.07.016
9. *Soltanieh G., Kabir M.Z., Shariyat M.* Improvement of the dynamic instability of shallow hybrid composite cylindrical shells under impulse loads using shape memory alloy wires // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 167. Pp. 167–179. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.12.040
10. *Trach V., Semenyuk M., Horuzhyi M.* Stability of thick-walled elastic anisotropic 3-dimensional cylindrical shells under axial pressure load // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 471. P. 032052. DOI: 10.1088/1757-899X/471/3/032052
11. *Na K.-S., Kim J.-H., Park J.-S.* Dynamic stability analyses of the liquid-filled cylindrical shells with lumped masses under a follower force // *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2019. Vol. 20. No. 3. Pp. 664–672. DOI: 10.1007/s42405-019-00203-3
12. *Dung D.V., Vuong P.M.* Analytical investigation on buckling and postbuckling of fgm toroidal shell segment surrounded by elastic foundation in thermal environment and under external pressure using TSDT // *Acta Mechanica*. 2017. Vol. 228. No. 10. Pp. 3511–3531.
13. *Hart E.L., Hudramovich V.S.* Application of the projection-iterative scheme of the method of local variations to solving stability problems for thin-walled shell structures under localized actions // *Strength of Materials*. 2018. Vol. 50. No. 6. Pp. 852–858. DOI: 10.1007/s11223-019-00031-6
14. *Jasion P., Magnucki K.* Theoretical investigation of the strength and stability of special pseudo-spherical shells under external pressure // *Thin-Walled Structures*. 2015. Vol. 93. Pp. 88–93. DOI: 10.1016/j.tws.2015.03.012
15. *Sowiński K., Jasion P.* Strength and stability of shells based on booth lemniscate loaded with exter-

nal pressure // *Thin-Walled Structures*. 2019. Vol. 144. P. 106284. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106284

16. *Coman C.D., Bassom A.P.* Eigen-transitions in cantilever cylindrical shells subjected to vertical edge loads // *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2019. Vol. 24. No. 3. Pp. 701–722. DOI: 10.1177/1081286517754133

17. *Dai Q., Cao Q.* Parametric instability of rotating cylindrical shells subjected to periodic axial loads // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018. Vol. 146–147. Pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.07.031

18. *Зубчанинов В.Г.* Устойчивость и пластичность. Т. 1. Устойчивость. М.: Физматлит, 2007. 448 с.

19. *Ильюшин А.А.* Механика сплошной среды. М.: Изд-во МГУ, 1990. 310 с.

20. *Зубчанинов В.Г., Алексеев А.А., Алексеева Е.Г.* Математическое моделирование процессов пластического деформирования материалов по сложным плоским траекториям // *Физика и механика материалов*. 2015. Т. 24. № 2. С. 107–118.

21. *Zubchaninov V.G., Alekseeva E.G., Alekseev A.A., Gultiaev V.I.* Modeling of elastoplastic steel deformation in two-link broken trajectories and delaying of vector and scalar material properties // *Materials Physics and Mechanics*. 2019. Vol. 42. No. 4. Pp. 436–444. DOI: 10.18720/MPM.4242019\_8

22. *Zubchaninov V.G., Alekseev A.A., Gultiaev V.I.* About drawing of the yield surface for steel 45 and verification of the postulate of isotropy on straight-line paths during repeated sign-variable loadings // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014. Vol. 3. Pp. 71–88. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.05

23. *Cheremnykh S., Kuzhin M.* Solution of the problem of stability of 40x steel shell // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1425. P. 012191. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012191

24. *Cheremnykh S., Zubchaninov V., Gultyaev V.* Deformation of cylindrical shells of steel 45 under

complex loading // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. P. 04025. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704025

25. *Черемных С.В., Соколов С.А., Гультяев В.И., Алексеев А.А.* Устойчивость упругопластических оболочек при сложных процессах комбинированного нагружения / под общ. ред. С.В. Черемных. Тверь: Тверской гос. технический ун-т, 2021.

26. *Zel'dovich V.I., Frolova N.Y., Kheifets A.E., Khomskaya I.V., Degtyarev A.A., Shorokhov E.V. et al.* Deformation phenomena in the collapse of metallic cylindrical shells. buckling // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2019. Vol. 55. No. 4. Pp. 456–465. DOI: 10.1134/S0010508219040129

27. *Lin H., Cao D., Shao C.* An admissible function for vibration and flutter studies of fg cylindrical shells with arbitrary edge conditions using characteristic orthogonal polynomials // *Composite Structures*. 2018. Vol. 185. Pp. 748–763. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.11.071

28. *Mohammadi A., Ghasemi F.A., Shahgholi M.* Stability analysis of an axially moving nanocomposite circular cylindrical shell with time-dependent velocity in thermal environments // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2019. Pp. 1–30. DOI: 10.1080/15397734.2019.1697933

29. *Kinash O., Abolmaali A., Park Y.* Meridian stresses in thin-walled steel pipes as reason for cross-sectional ovalization // *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2017. Vol. 8. No. 2. P. 04016017. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000246

30. *Rashvand K., Alibeigloo A., Safarpour M.* Free vibration and instability analysis of a viscoelastic micro-shell conveying viscous fluid based on modified couple stress theory in thermal environment // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2020. Pp. 1–39. DOI: 10.1080/15397734.2020.1745079

Поступила в редакцию 9 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 20 мая 2021 г.

Одобрена для публикации 20 мая 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Степан Валерьевич Черемных** — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры конструкций и сооружений; **Тверской государственный технический университет (ТвГТУ)**; 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22; РИНЦ ID: 712359, Scopus: 57214785020, ResearcherID: AАН-2997-2021, ORCID: 0000-0002-4620-117X; cheremnykh\_s.v@mail.ru;

**Сергей Александрович Соколов** — кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений; **Тверской государственный технический университет (ТвГТУ)**; 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22; РИНЦ ID: 974101; gek.tver@mail.ru.

## REFERENCES

1. Semenyuk N.P., Trach V.M., Podvornyi A.V. Spatial stability of layered anisotropic cylindrical shells under compressive loads. *International Applied Mechanics*. 2019; 55(2):211-221. DOI: 10.1007/s10778-019-00951-5

2. Mikilyan M., Marzocca P. Vibration and stability of coaxial cylindrical shells with a gap partially filled with liquid. *Journal of Aerospace Engineering*. 2019; 32(6):06019006. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001077
3. Olevskiy V., Olevska Y. Mathematical model of elastic closed flexible shells with nonlocal shape deviations. *Journal of Geometry and Symmetry in Physics*. 2018; 50:57-69. DOI: 10.7546/jgsp-50-2018-57-69
4. Trinh M.C., Kim S.E. Nonlinear stability of moderately thick functionally graded sandwich shells with double curvature in thermal environment. *Aerospace Science and Technology*. 2019; 84:672-685. DOI: 10.1016/j.ast.2018.09.018
5. Bakulin V.N., Konopelchev M.A., Nedbay A.Ya. Aeroelastic stability of a cylindrical shell of linearly varying thickness. *Doklady Physics*. 2019; 64(9):360-364. DOI: 10.1134/S1028335819090015
6. Zippo A., Barbieri M., Pellicano F. Temperature gradient effect on dynamic properties of a polymeric circular cylindrical shell. *Composite Structures*. 2019; 216:301-314. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.02.098
7. Duc N.D., Thiem H.T. Dynamic analysis of imperfect FGM circular cylindrical shells reinforced by fgm stiffener system using third order shear deformation theory in term of displacement components. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2017; 14(13):2534-2570. DOI: 10.1590/1679-78253516
8. Wagner H.N.R., Hühne C., Khakimova R. Towards robust knockdown factors for the design of conical shells under axial compression. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018; 146-147:60-80. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.07.016
9. Soltanieh G., Kabir M.Z., Shariyat M. Improvement of the dynamic instability of shallow hybrid composite cylindrical shells under impulse loads using shape memory alloy wires. *Composites Part B: Engineering*. 2019; 167:167-179. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.12.040
10. Trach V., Semenyuk M., Horuzhyi M. Stability of thick-walled elastic anisotropic 3-dimensional cylindrical shells under axial pressure load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 471:032052. DOI: 10.1088/1757-899X/471/3/032052
11. Na K.-S., Kim J.-H., Park J.-S. Dynamic stability analyses of the liquid-filled cylindrical shells with lumped masses under a follower force. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2019; 20(3):664-672. DOI: 10.1007/s42405-019-00203-3
12. Dung D.V., Vuong P.M. Analytical investigation on buckling and postbuckling of fgm toroidal shell segment surrounded by elastic foundation in thermal environment and under external pressure using TSDT // *Acta Mechanica*. 2017. Vol. 228. Issue 10. Pp. 3511–3531.
13. Hart E.L., Hudramovich V.S. Application of the projection-iterative scheme of the method of local variations to solving stability problems for thin-walled shell structures under localized actions. *Strength of Materials*. 2018; 50(6):852-858. DOI: 10.1007/s11223-019-00031-6
14. Jasion P., Magnucki K. Theoretical investigation of the strength and stability of special pseudospherical shells under external pressure. *Thin-Walled Structures*. 2015; 93:88-93. DOI: 10.1016/j.tws.2015.03.012
15. Sowiński K., Jasion P. Strength and stability of shells based on booth lemniscate loaded with external pressure. *Thin-Walled Structures*. 2019; 144:106284. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106284
16. Coman C.D., Bassom A.P. Eigen-transitions in cantilever cylindrical shells subjected to vertical edge loads. *Mathematics and Mechanics of Solids*. 2019; 24(3):701-722. DOI: 10.1177/1081286517754133
17. Dai Q., Cao Q. Parametric instability of rotating cylindrical shells subjected to periodic axial loads. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018; 146-147:1-8. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.07.031
18. Zubchaninov V.G. *Stability and ductility. Vol. 1 Stability*. Moscow, Fizmatlit, 2007; 448. (rus.).
19. Ilyushin A.A. *Continuum Mechanics*. Moscow, Publishing house of Moscow State University, 1990; 310. (rus.).
20. Zubchaninov V.G., Alekseev A.A., Alekseeva E.G. Mathematical modeling of plastic deformation of materials on complex flat trajectories. *Materials Physics and Mechanics*. 2015; 24(2):107-118. (rus.).
21. Zubchaninov V.G., Alekseeva E.G., Alekseev A.A., Gultiaev V.I. Modeling of elastoplastic steel deformation in two-link broken trajectories and delaying of vector and scalar material properties. *Materials Physics and Mechanics*. 2019; 42(4):436-444. DOI: 10.18720/MPM.4242019\_8
22. Zubchaninov V.G., Alekseev A.A., Gulyaev V.I. About drawing the yield surface for steel 45 and verifying the postulate of isotropy on straight-line paths under repeated sign-variable loadings. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014; 3:71-88. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.05
23. Cheremnykh S., Kuzhin M. Solution of the problem of stability of 40x steel shell. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1425:012191. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012191
24. Cheremnykh S., Zubchaninov V., Gulyaev V. Deformation of cylindrical shells of steel 45 under complex loading. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:04025. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704025
25. Cheremnykh S.V., Sokolov S.A., Gulyaev V.I., Alekseev A.A. *Stability of elastoplastic shells in complex processes of combined loading / under total*. ed. S.V. Cheremnykh. Tver, Tver State Technical University, 2021. (rus.).
26. Zel'dovich V.I., Frolova N.Y., Kheifets A.E., Khomskaya I.V., Degtyarev A.A., Shorokhov E.V. et al. Deformation phenomena in the collapse of metal-

lic cylindrical shells. Buckling. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2019; 55(4):456-465. DOI: 10.1134/S0010508219040129

27. Lin H., Cao D., Shao C. An admissible function for vibration and flutter studies of fg cylindrical shells with arbitrary edge conditions using characteristic orthogonal polynomials. *Composite Structures*. 2018; 185:748-763. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.11.071

28. Mohammadi A., Ghasemi F.A., Shahgholi M. Stability analysis of an axially moving nanocomposite circular cylindrical shell with time-dependent velocity in thermal environments. *Mechanics Based De-*

*sign of Structures and Machines*. 2019; 1-30. DOI: 10.1080/15397734.2019.1697933

29. Kinash O., Abolmaali A., Park Y. Meridian stresses in thin-walled steel pipes as reason for cross-sectional ovalization. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2017; 8(2):04016017. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000246

30. Rashvand K., Alibeigloo A., Safarpour M. Free vibration and instability analysis of a viscoelastic microshell conveying viscous fluid based on modified couple stress theory in thermal environment. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2020; 1-39. DOI: 10.1080/15397734.2020.1745079

Received March 9, 2021.

Adopted in revised form on May 20, 2021.

Approved for publication on May 20, 2021.

**Bi o n o t e s :** **Stepan V. Cheremnykh** — Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Constructions and Structures; **Tver State Technical University (TvSTU)**; 22 A. Nikitin embankment, Tver, 170026, Russian Federation; ID RISC: 712359, Scopus: 57214785020, ResearcherID: AAH-2997-2021, ORCID: 0000-0002-4620-117X; cheremnykh\_s.v@mail.ru;

**Sergei A. Sokolov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures; **Tver State Technical University (TvSTU)**; 22 A. Nikitin embankment, Tver, 170026, Russian Federation; ID RISC: 974101; gek.tver@mail.ru.

## Исследование развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации

А.А. Соловьева, С.А. Соловьев

Вологодский государственный университет (ВоГУ); г. Вологда, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Изучены подходы к моделированию случайных величин в задачах расчетов надежности элементов строительных конструкций при неполной (ограниченной) статистической информации. Задачи исследования — постановка проблемы вероятностного расчета надежности строительных конструкций при неполной статистической информации, развитие подходов к созданию моделей случайных величин в рамках этой проблемы, а также оценка текущего состояния вопроса и некоторых перспектив развития на ближайшие годы.

**Материалы и методы.** Основная модель случайной величины — р-блок (probability box), представляющий собой область возможных функций распределений вероятностей случайной величины, сформированную двумя граничными функциями распределения вероятностей. Рассмотрены р-блоки, построенные на основе теории нечетких множеств, теории вероятностей, границ Колмогорова – Смирнова и др.

**Результаты.** Использование рассмотренных подходов проиллюстрировано на числовых примерах построения р-блоков по одним и тем же статистическим данным. Р-блок на основе теории вероятностей позволяет достаточно точно смоделировать случайную величину, однако требуется наличие априорной информации о виде функции распределения. Р-блок на основе теории возможностей можно применять даже при наличии крайне малого числа статистических данных, но также необходимо аккуратно подходить к вопросу назначения уровня среза (риска). Р-блоки на основе неравенства П.Л. Чебышева и статистики Колмогорова – Смирнова дают возможность эффективно моделировать случайные величины вне зависимости от вида вероятностного распределения. Однако в ряде задач такие подходы могут дать слишком неинформативную оценку для принятия решений.

**Выводы.** Выбор вероятностной модели случайной величины для дальнейшего расчета надежности элементов строительных конструкций будет зависеть от количества и типа полученной статистической информации о случайной величине. Для отдельных случаев, например статистической информации в виде подмножества интервалов, могут быть использованы специальные подходы, основанные на теории свидетельств Демпстера – Шефера. Перспективным и актуальным направлением развития вероятностных моделей случайных величин и методов анализа надежности строительных конструкций при неполной статистической информации представляются численные методы моделирования с использованием суррогатных моделей (кригинг, байесовские сети, интервальные предикторы и др.) и нейросетевых алгоритмов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** надежность, вероятность отказа, случайная величина, теория нечетких множеств, теория случайных множеств, р-блоки, безопасность, неточные вероятности

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Соловьева А.А., Соловьев С.А. Исследование развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 5. С. 587–607. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607

## A research into the development of models of random variables as part of the structural reliability analysis performed in the absence of some statistical information

Anastasia A. Soloveva, Sergey A. Solovev

Vologda State University (VSU); Vologda, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The scientific review article addresses the approaches to the modeling of random variables performed as part of the structural reliability analysis of elements provided that some statistical information missing (limited). The objectives of the research include the statement of the problem of the probabilistic structural reliability analysis subject to incomplete statistical data, the study of the development of approaches to the generation of models of random variables within the framework of this problem, as well as the assessment of the current state of affairs in this field and some development prospects for the coming years.

**Materials and methods.** The principal model of a random variable, considered in the article, represents a p-box (probability box) model. A p-box is an area of possible functions of distributed probabilities of a random variable generated by the two boundary functions of the probability distribution. The article addresses p-boxes generated using the fuzzy set theory, the probability theory, Kolmogorov–Smirnov boundaries, etc.

**Results.** The approaches, considered in the article, are illustrated by the numerical examples of p-boxes that use the same statistical data. P-boxes, based on the probability theory, allow to accurately simulate a random variable; however, a priori information about the type of the distribution function is needed. P-boxes, based on the possibility theory, can be used even if an extremely small amount of statistical data is available, and it is also necessary to carefully address the issue of assigning the cutoff (risk) level. P-boxes based on the Chebyshev inequality and the Kolmogorov–Smirnov statistics allow to effectively simulate random variables regardless of the type of the probability distribution. However, these approaches may generate an assessment that is too uninformative for decisions to be made in a number of tasks.

**Conclusions.** The choice of a probabilistic model of a random variable for the further reliability analysis of structural elements will depend on the amount and type of statistical data obtained about the random variable. In particular cases, if the statistical information represents a subset of intervals, special approaches based on the Dempster–Shafer theory can be used. A promising and relevant method that underlies both the development of probabilistic models of random variables and the analysis of structural reliability in case of missing statistical information encompasses the employment of numerical modeling methods that employ surrogate models (kriging, Bayesian networks, interval predictors, etc.) and neural network algorithms.

**KEYWORDS:** reliability, failure probability, random variable, fuzzy set theory, random set theory, p-boxes, safety, imprecise probabilities

**FOR CITATION:** Soloveva A.A., Solovev S.A. A research into the development of models of random variables as part of the structural reliability analysis performed in the absence of some statistical information. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(5):587-607. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.587-607 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

«Вероятность — самое важное понятие в современной науке. Особенно потому, что никто не имеет ни малейшего представления о том, что оно означает» (Бертран Рассел, 1929) [1].

Развитие вероятностных подходов к оценке механической (конструкционной) безопасности несущих элементов строительных конструкций зданий и сооружений является актуальной научной задачей в свете требований Федерального закона РФ № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» и Межгосударственного стандарта ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований». В статье [2] подчеркивается, что «с развитием цифровых технологий, с возрастающими возможностями численных расчетов появляется острая необходимость в развитии стохастических подходов в строительстве на базе математической статистики, теории вероятности, теории надежности и других дисциплин». В работе [3] указывается, что моделирование работы строительных конструкций связано с оценкой неопределенностей различного рода, которые могут быть учтены путем использования методов теории надежности и вероятностного проектирования. «Вероятностные методы, используемые при оценке надежности конструкций, зданий и сооружений, являются наиболее обоснованными, отражающими природу случайного характера поведения конструкции», — констатируют авторы исследования [4].

Как отмечает доктор технических наук, профессор А.Г. Тамразян: «Для проектирования конструкций с учетом требований обеспечения их прочности, устойчивости, долговечности принцип безопасности может быть реализован в максимальной мере только при условии дальнейшего развития следующих фундаментальных вопросов:

1. Представление прочности и нагрузок в виде случайных величин и случайных процессов; вероятностная природа коэффициентов надежности; виды

отказов конструкций; вероятность отказа как многомерный интеграл по области отказа; характеристика безопасности.

2. Методы оценки надежности конструкций; характеристики и функции случайных величин; распределение максимумов многих случайных величин; вероятность редких событий; анализ случайных процессов; теория выбросов; нестационарные случайные процессы.

3. Нормирование надежности конструкций с экономическими, неэкономическими и смешанными типами ответственности; оценка неэкономических потерь; определение риска; оптимальный и норматив уровень надежности; вероятностная оптимизация конструкций» [5].

Так, п. 4.6. СП 63.13330.2018 уже содержит возможность расчета конструкций по заданному уровню надежности путем вероятностного анализа: «Расчет бетонных и железобетонных конструкций можно производить по заданному значению надежности на основе полного вероятностного расчета при наличии достаточных данных об изменчивости основных факторов, входящих в расчетные зависимости». Однако с практической и методической точек зрения данный момент еще не до конца проработан.

Одной из наиболее важных задач в рамках расчета строительных конструкций на надежность является подбор и обоснование вероятностных моделей случайных величин. Эту задачу на практике значительно осложняет неопределенность данных, полученная в результате недостатка статистической информации. В публикации [6] обозначено, что «неопределенность — это неотъемлемое свойство, которое широко существует в инженерных конструкциях. Неопределенность представляет собой геометрические размеры, свойства материала, внешние нагрузки и условия эксплуатации и т.д. [7]. Эти неопределенности, если их игнорировать, могут привести к низкой надежности инженерных сооружений и даже катастрофическим последствиям. В связи с этим неопределенность привлекла широкое внимание в по-

следние десятилетия [8]. Для решения этих проблем была разработана теория надежности строительных конструкций». Исследование проблемы неопределенностей в вероятностных моделях для описания случайных величин являлось и является темой для дискуссий ученых и инженеров [9, 10].

Хотя источников неопределенности может быть много, в контексте моделирования случайных величин традиционно выделяют два типа неопределенностей: алеаторная и эпистемологическая неопределенности.

Слово «алеаторный» происходит от латинского *alea*, что означает «жребий, игральная кость». Алеаторная неопределенность возникает из-за стохастической природы окружающей среды, неоднородности материалов, флуктуаций во времени, вариаций в пространстве или других различий. Таким образом, алеаторная неопределенность — это неопределенность, которая является внутренней случайностью явления. Иногда алеаторную неопределенность называют «неопределенность I типа» или «неснижаемая неопределенность».

Слово «эпистемологический» происходит от греческого ἐπιστήμη (эпистема), что означает «знание». Эпистемологическая неопределенность — это неопределенность, которая, как предполагается, вызвана недостатком знаний (или данных). Это также неуверенность, которая возникает из-за научного невежества, неопределенности измерений, наблюдаемости, цензурирования данных или другого недостатка знаний. Эпистемологическую неопределенность называют также «неопределенность II типа» или «редуцируемая (снижаемая) неопределенность», так как она, в отличие от алеаторной неопределенности, как правило, может быть уменьшена дополнительными эмпирическими усилиями: испытаниями, измерениями, наблюдениями и др.

Выбор типа неопределенности для случайной величины зависит от типа решаемой задачи по оценке надежности. Например, рассмотрим прочность бетона как случайную величину: если анализировать прочность бетона в существующей железобетонной конструкции, то неопределенность относится к категории эпистемологической, поскольку она может быть уменьшена путем увеличения количества контрольных образцов бетона. Конечно, тестирование может включать случайные ошибки измерения, особенно если используются регрессионные модели в неразрушающих методах контроля прочности. Эта неопределенность также должна быть классифицирована как эпистемологическая, если есть возможность исследовать альтернативные методы контроля прочности [9].

С другой стороны, неопределенность в прочности бетона в контексте проектируемого здания следует отнести к категории алеаторной, если не будет попыток сделать более детальное моделирование, связанное, например, с контролем производства бе-

тона. До тех пор, пока здание не будет фактически построено, никакие испытания не уменьшат изменчивость и неопределенность, присущую прочности бетона будущего здания. Как отмечено в труде [11], характер алеаторной неопределенности «трансформируется» в эпистемологическую неопределенность по мере реализации здания.

Таким образом, можно считать, что алеаторная неопределенность моделируется функцией распределения вероятностей случайной величины на базе инструментов теории вероятностей и математической статистики. Однако при ограниченной или некачественной статистической информации описание алеаторной природы объекта становится затруднительным, и для учета этого недостатка требуются модели эпистемологической неопределенности. Комбинация двух типов неопределенностей дает достоверную модель случайной величины для дальнейших расчетов надежности строительных конструкций.

В работе [12] предлагается другая классификация неопределенностей при анализе надежности — неопределенность данных и неопределенность расчетной модели.

Произвольность в выборе закона распределения вероятностей случайных величин и чувствительность «хвостов» вероятностных распределений в области малых вероятностей привели к необходимости ввода рекомендаций, стандартизирующих законы и функции распределения вероятностей для случайных величин, входящих в математические модели нагрузки и несущей способности [13].

Моделирование алеаторной неопределенности — задача теории вероятностей и математической статистики, а моделирование эпистемологической неопределенности (недостаток статистических данных, субъективность экспертных оценок и т.д.) — предметная область таких наук, как теория нечетких множеств, теория свидетельств Демпстера – Шеффера и др. Как отмечено в исследовании [14], традиционный подход к анализу надежности строительных конструкций требует наличия полной статистической информации о видах распределений вероятностей случайных величин. Однако при решении практических задач зачастую не удается получить такую информацию в связи с ограниченной по объему статистической выборкой данных, вследствие ограниченности времени на проведение испытаний, высокой стоимости отдельных испытаний, невозможности получить большое количество контрольных образцов из индивидуальных элементов и т.д. Даже небольшая неточность или субъективность в выборе функции распределения вероятностей случайной величины может привести к большим ошибкам в анализе надежности строительных конструкций [15].

Только в отдельных специальных задачах можно рассматривать вероятность события как относительную частоту физического появления события в длин-

ной серии независимых повторений неизменного эксперимента, в котором событие может произойти [9]. В области надежности и структурной безопасности строительных конструкций несколько очень важных источников неопределенности не проявляют такого повторяющегося поведения при одинаковых обстоятельствах. Интерпретация стабильной долгосрочной частоты появления события как абсолютной вероятности в физическом смысле «подлежит утопии» [9] в контексте расчета строительных конструкций на надежность. Следовательно, полезность концепции вероятности должна основываться на другом рациональном основании. Тем не менее интерпретация математической вероятности, как относительной частоты, имеет решающее значение для ее полезности в качестве средства выражения степени убежденности относительно наступления события. Чтобы сделать вероятностную модель подлежащей прагматическому тесту фальсификации (согласно концепции Матерона [16], основанной на идее Поппера [17]), необходимо, чтобы некоторый тип относительного частотного поведения был связан с вероятностной моделью. Подробное обсуждение философии этого вопроса объективности дано в работе Дитлевсена и Мадсена [18].

В работе [9] рассматривается проблема влияния объема выборки на вероятность отказа или индекс надежности. В качестве оценки математического ожидания зачастую используется среднее арифметическое значение выборки в расчетах надежности [19, 20]. С ростом объема выборки происходит изменение выборочного среднего арифметического значения случайной величины. На рис. 1 приведены графики зависимостей результата моделирования [9], отражающие влияние объема выборки статистических данных о случайной величине на результат расчета надежности.

Как видно из рис. 1, недостаток статистической информации и принятие субъективных статистически необоснованных решений приводит к оши-

бочным результатам расчета надежности в виде индекса надежности или вероятности отказа. Для решения этой проблемы необходима разработка методов оценки и анализа надежности строительных конструкций, учитывающих неопределенность и ограниченность статистической информации.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Класс задач в рамках теории надежности строительных конструкций, в которых следует использовать специальные подходы для создания статистических моделей случайных величин с учетом эпистемологической неопределенности, называется методами расчета надежности при ограниченной (неполной) статистической информации.

В исследовании [21] Ферсон выделяет 8 классов расчетных ситуаций, когда необходимо использовать специальные методы расчета надежности при неполной статистической информации:

- неточные (например, интервальные) оценки параметров распределений случайных величин;
- неточная информация или отсутствие информации о корреляционной зависимости случайных величин в математических моделях предельных состояний;
- неопределенность методов и средств измерений;
- цензурирование данных измерений;
- малый размер выборочной совокупности статистических данных;
- низкое качество исходных статистических данных;
- неопределенность математической модели;
- нестационарность (непостоянность функций распределения вероятностей).

В настоящей работе предлагается рассмотреть историю развития и сравнительный анализ методов моделирования случайных величин в задачах вероят-

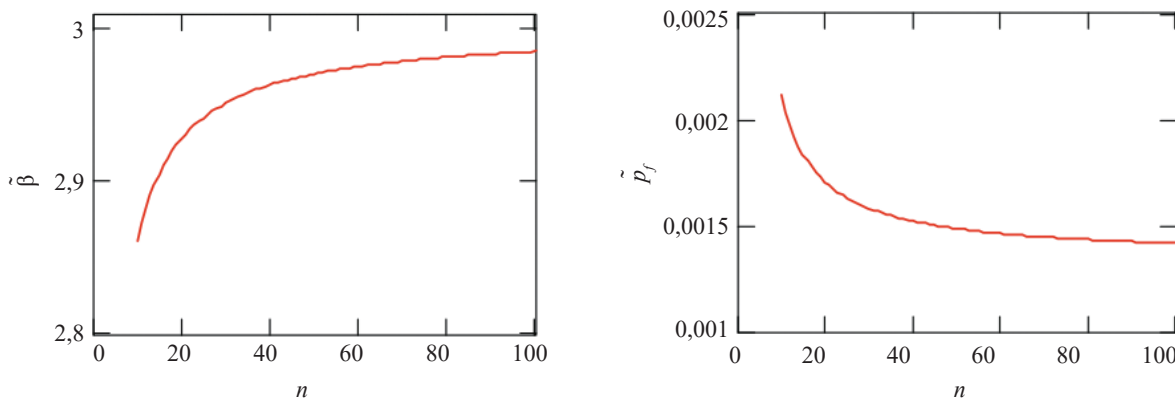


Рис. 1. Графики влияния числа испытаний на индекс надежности  $\beta$  и вероятность отказа  $p_f$  при использовании выборочных оценок параметров распределений

Fig. 1. Graphs illustrating the influence of the number of tests on reliability index  $\beta$  and failure probability  $p_f$  if sample estimates of distribution parameters are used

ностного расчета надежности строительных конструкций при неполной статистической информации.

Одним из самых распространенных подходов к моделированию эпистемологической неопределенности при анализе надежности и риска строительных конструкций служит представление функции распределения вероятностей не в виде точной функции, а в виде области, ограниченной нижней и верхней граничными функциями распределения вероятностей, внутри которой располагается действительная (но наперед неизвестная) функция распределения вероятностей. Такая область получила название р-блок (p-box, probability box).

Подходы к расчету надежности на основе р-блоков позволяют получить интервальную (менее информативную) оценку надежности элементов строительных конструкций, но статистически более достоверную и обоснованную. К тому же, принятие решений может быть осуществлено по нижней границе интервала в случае больших вероятностей безотказной работы. Чем точнее и качественнее статистическая информация, тем уже границы р-блока и ближе границы интервала, характеризующего надежность.

Идея моделирования распределения вероятностей случайной величины в виде области, сформированной граничными функциями распределения, окончательно сформирована несколькими независимыми исследованиями [22, 23], хотя теоретические предпосылки для них были опубликованы ранее [24]. Для большей наглядности научной обзорной статьи рассмотренные модели будем сравнивать на общем примере случайной величины: сгенерируем в программе PTC MathCAD восемь значений случайной величины с параметрами: математическое ожидание  $m_X = 300$  МПа и стандартное отклонение  $S_X = 15$  МПа. Предположим, что эти значения являются результатом численного эксперимента по оценке прочности стали несущего элемента строительной конструкции. Так, по результатам генерации данных были получены следующие значения  $X = \{303,58; 289,73; 275,78; 321,17; 314,57; 282,66; 302,16; 325,46\}$  МПа [25].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Интервальная оценка параметров вероятностных распределений.** Известно, что при анализе выборочной совокупности статистических данных мы можем получить лишь оценки статистических параметров их генеральной совокупности в виде доверительных интервалов: для математического ожидания  $m_X \in [\underline{m}_X; \bar{m}_X]$  и для стандартного отклонения  $S_X \in [\underline{S}_X; \bar{S}_X]$ , где  $\underline{m}_X$  и  $\bar{m}_X$  — нижняя и верхняя доверительные границы для математического ожидания;  $\underline{S}_X$  и  $\bar{S}_X$  — нижняя и верхняя доверительные границы для среднеквадратического отклонения. Ширина (размах) этих интервалов будет зависеть от уровня доверительной вероятности и числа испытаний/измерений.

Для практических задач строительной отрасли может потребоваться нерационально большое число испытаний/измерений для того, чтобы получить доверительный интервал с небольшим размахом, который можно было бы заменить точной оценкой статистического параметра. Например, по результатам вышеуказанных сведений [25], доверительная оценка для математического ожидания составит  $m_X \in [288; 315]$  МПа, для среднеквадратического отклонения  $S_X \in [3,38; 30,46]$  МПа.

На рис. 2 приведены все возможные варианты графиков функций нормального распределения по граничным значениям вышеуказанных параметров, а также  $F_X^{emp}(x)$  — эмпирическая функция распределения вероятностей и  $F_X^{real}(x)$  — функция нормального распределения вероятностей при параметрах генерации данных (реальная функция). Тогда, в соответствии с определением р-блока, можно сформировать следующие граничные функции распределения вероятностей для данного р-блока:

$$F_X(x) = \begin{cases} F_X^{norm}(\underline{m}_X, \bar{S}_X), & \text{если } x < \underline{m}_X; \\ F_X^{norm}(\underline{m}_X, \underline{S}_X), & \text{если } x \geq \underline{m}_X, \end{cases}$$

$$\bar{F}_X(x) = \begin{cases} F_X^{norm}(\bar{m}_X, \underline{S}_X), & \text{если } x < \bar{m}_X; \\ F_X^{norm}(\bar{m}_X, \bar{S}_X), & \text{если } x \geq \bar{m}_X, \end{cases}$$

где  $F_X^{norm}$  — функция нормального распределения вероятностей.

Из рис. 2 видно, что реальная  $F_X^{real}(x)$  (но наперед неизвестная в практических задачах) функция распределения вероятностей попадает в область, формируемую граничными функциями распределения вероятностей р-блока  $F_X(x)$  и  $\bar{F}_X(x)$ . Однако для использования данной модели случайной величины необходимо знать параметрическую функцию распределения вероятностей в качестве априорной

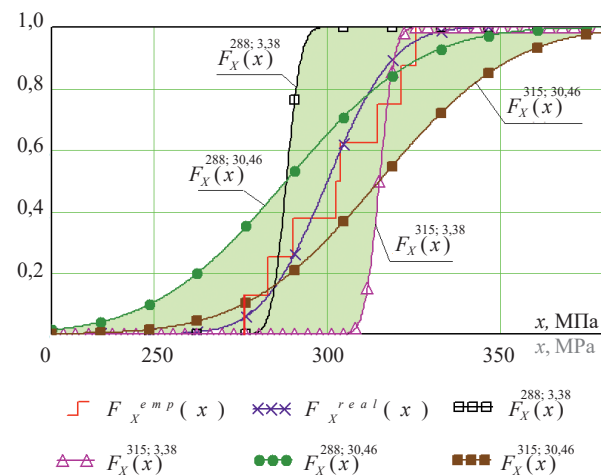


Рис. 2. Р-блок, построенный по интервальным границам параметров нормального распределения

Fig. 2. A p-box based on the interval boundaries of parameters of normal distribution

информации или подтверждать ее с помощью критериев согласия, например, критерия Шапиро – Уилка. Обоснование параметрической функции распределения вероятностей может потребовать ни один десяток испытаний контрольных образцов, что ограничивает область применения данного р-блока в практических задачах анализа надежности строительных конструкций.

Подробная информация о формировании р-блоков данного типа и примеры расчета надежности строительных конструкций с моделированием случайных величин такими р-блоками рассмотрены в исследованиях [26–29].

**Теория нечетких множеств и теория возможностей.** Нечеткие множества и теория нечетких множеств были предложены математиком Лотфи Заде в 1965 г. [30]. Классическое понятие множества было расширено путем допущения, что характеристическая функция множества (названная Заде функцией принадлежности  $\mu_F(w)$  для нечеткого множества  $F$ ) может принимать любые значения в интервале  $[0; 1]$ , а не только 0 или 1. Функция принадлежности  $\mu_F(w)$  отражает, насколько элемент  $w$  универсального множества  $\Omega$  принадлежит нечеткому множеству  $F$ . Более подробную информацию о нечетких множествах и функциях принадлежности можно найти в работе [31].

Используя основные идеи теории нечетких множеств, для моделирования неопределенности были предложены меры или функции возможности [32]. Теория возможностей получила дальнейшее развитие в работах Д. Дюбуа и А. Прада [33]. В расчетах надежности элементов строительных конструкций применяется функция распределения возможностей, обозначаемая, например, для нечеткой переменной  $X$ :  $\pi_X(x)$ . Функция распределения возможностей  $\pi_X(x)$  по всем признакам имеет свойства, аналогичные функции принадлежности  $\mu_F(x)$  некоторого множества или нечеткого числа. Однако это не означает, что понятия нечеткого множества и распределения возможностей являются одинаковыми. В литературе довольно часто путают понятия функции принадлежности и функции распределения возможностей нечеткой переменной и нечеткого множества [31]. Хотя в большинстве случаев такое «неточное» использование понятий не приводит к грубым ошибкам, следует четко различать перечисленные выше понятия. Равенство  $\pi_X(x) = \mu_F(x)$  в большей степени аналогично равенству между функцией правдоподобия и условной вероятностью в теории вероятностей. Запись  $\pi_X(x)$  является сокращенной записью для  $\pi_X(X = x | F)$ , так как данная функция оценивает возможность равенства  $X = x$  при условии, что известно только нечеткое утверждение « $X$  есть  $F$ ». Функция принадлежности  $\mu_F(x)$  оценивает степень совместимости точной информации  $X = x$  с нечетким утверждением « $X$  есть  $F$ ». Другими словами, нечеткая переменная и функция распределения возможностей характери-

зуют событие, а нечеткое множество — плохо определенное понятие, связанное с событием.

В исследовании [34] рассматривается подход к построению функций принадлежности прочности бетона на основе анализа экспериментальных данных. Аналогично в работе [35] изучаются различные варианты построения функции принадлежности нечеткого множества в контексте различных повреждений железобетонных плит перекрытий.

В труде [31] отмечается, что унимодальную функцию распределения возможностей  $\pi_X(x)$  можно представить в виде р-блока следующим образом:

$$\underline{F}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq x_0; \\ 1 - \pi_X(x), & x > x_0, \end{cases}$$

$$\overline{F}(x) = \begin{cases} \pi_X(x), & x \leq x_0; \\ 1, & x > x_0, \end{cases}$$

где  $x_0$  — точка максимума функции распределения возможностей.

Полученный р-блок имеет важное свойство: существует такая точка  $x_0 \in \mathfrak{R}$ , что  $\underline{F}(x) = 0$  и  $\overline{F}(x) = 1$ . Это означает, что р-блок содержит такое значение  $x_0$ , что два распределения вероятностей, «действующие» в различных областях вещественной оси, разделяются этим значением.

Использование положений теории возможностей и теории нечетких множеств для анализа надежности элементов строительных конструкций получило распространение с 80-х годов прошлого века. Одной из первых работ в данном направлении стала публикация Н. Ширази и Х. Фурута [36]. Приблизительно в это же время вышла статья про анализ надежности элемента под сейсмической нагрузкой при рассмотрении параметров нагрузки и прочности в виде нечетких переменных [37].

В дальнейшем данные идеи получили развитие в разных подходах к оценке надежности различных типов строительных конструкций [38–41]. В Российской Федерации приложение теории нечетких множеств и теории возможностей для расчета надежности элементов строительных и машиностроительных конструкций описано в работах профессора В.С. Уткина [42–46]. В качестве функции распределения возможностей в этих работах используется функция  $\pi_X(x)$  с аналитическим видом:

$$\pi_X(x) = \exp \left[ - \left( \frac{x - a_x}{b_x} \right) \right],$$

где  $a_x = 0,5(X_{\max} + X_{\min})$ ,  $b_x = 0,5 \frac{(X_{\max} - X_{\min})}{\sqrt{-\ln \alpha}}$ ;

$X_{\max}$  и  $X_{\min}$  — максимальное и минимальное значения в подмножестве  $X$  (в выборке);  $\alpha$  — уровень среза (риска), значением которого задаются.

В 2000 годы сформировались инженерные методики расчета надежности элементов строительных конструкций с использованием теории нечетких

множеств и теории возможностей [47–50]. В исследовании [51] приводится сравнение вероятностного анализа большого количества экспериментальных данных характеристик прочности каменной кладки стены с анализом на основе теории нечетких множеств с использованием вышеописанной функции распределения возможностей. Отмечается, что при малых объемах выборки могут быть получены надежные решения нечетких задач оценки качества. Сравнительными расчетами с применением статистического метода и метода теории возможностей показано, что при ограниченной информации о контролируемых параметрах достаточно малой выборки для надежного определения параметров нормального распределения и вероятности дефекта.

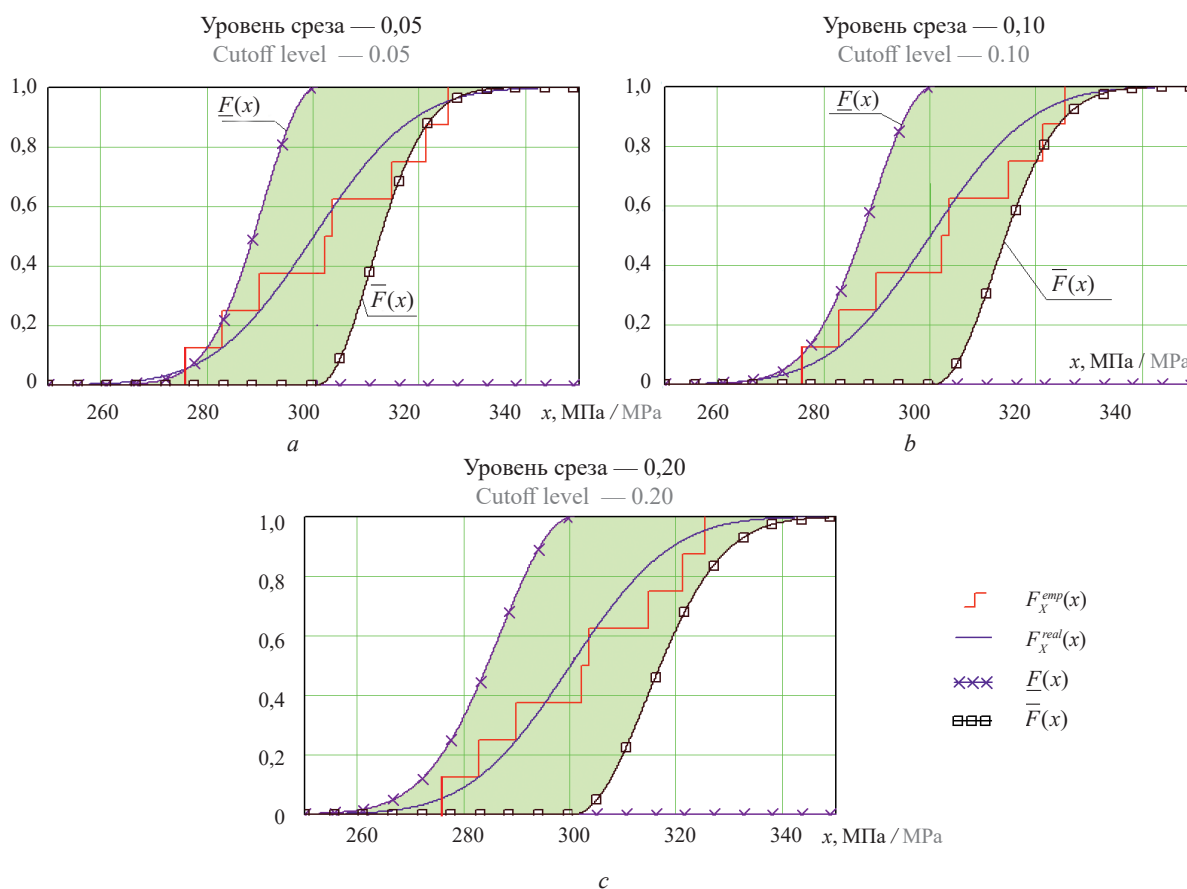
В работе [52] разработан метод диагностики технического состояния конструкций зданий и сооружений с использованием методов теории нечетких множеств и обобщенной формулы Байеса. В исследовании [53] создана экспертная система для оценки технического состояния железобетонных конструкций по результатам визуального осмотра на базе пакета Fuzzy Logic Toolbox в среде MatLab, которая позволяет определить класс технического состояния конструкции на основе шести имеющихся фак-

торов: повреждения бетона, снижающие защитные свойства по отношению к арматуре (карбонизация); образование продольных трещин в защитном слое бетона вдоль сжатых стержней; образование продольных трещин в защитном слое бетона вдоль растянутых стержней; глубина коррозии арматуры; образование нормальных, наклонных трещин и прогибы (перемещения). В труде [54] рассматриваются проблемы математического моделирования организации строительного производства с использованием теории нечетких множеств. Приводятся примеры применения теории нечетких множеств в задачах оптимального распределения количества рабочих, моделирования размытости при оценке возможности бетонирования в условиях пониженных и повышенных температур и др.

Теория возможностей и теория нечетких множеств для моделирования случайных или неточных (размытых) величин рассмотрены также в ряде других задач строительной отрасли [55].

Широкое применение теория нечетких множеств и теория возможностей получили в области расчета надежности гидротехнических сооружений [56–58].

Как видно из рис. 3, уровень риска (среза)  $\alpha$  существенно влияет на границы р-блока. Так, уровень



**Рис. 3.** Р-блок, построенный на основе функции распределения возможностей  $\pi_x(x)$  при различных уровнях среза (риска)  $\alpha$ :  $a$  —  $\alpha = 0,05$ ;  $b$  —  $\alpha = 0,10$ ;  $c$  —  $\alpha = 0,20$

Fig. 3. A p-box based on possibility distribution function  $\pi_x(x)$  at different cutoff (risk) levels  $\alpha$ :  $a$  —  $\alpha = 0.05$ ;  $b$  —  $\alpha = 0.10$ ;  $c$  —  $\alpha = 0.20$

риска  $\alpha = 0,05$  создает р-блок, который не покрывает действительное распределение вероятностей  $F_X^{real}(x)$  в области хвостов. Уровень риска  $\alpha = 0,20$ , рекомендованный в [56], покрывает и эмпирическую  $F_X^{emp}(x)$ , и реальную  $F_X^{real}(x)$  функции распределения вероятностей. Следовательно, уровень риска является необходимой априорной информацией для построения р-блока на основе функций распределения вероятностей, что может привести к определенным ошибкам при субъективном принятии решения о его значении.

**Неравенство П.Л. Чебышева/Кантелли.**

В случае, если известны математическое ожидание случайной величины  $m_X$  и ее дисперсия  $S_X^2$ , то двухстороннее неравенство П.Л. Чебышева может быть использовано для построения граничных функций распределения вероятностей р-блока случайной величины  $X$  [59] в виде:

$$\underline{F}_X(x) = \begin{cases} 0, & x < m_X - S_X; \\ 1 - \frac{S_X^2}{(x - m_X)^2}, & x \geq m_X - S_X, \end{cases}$$

$$\bar{F}_X(x) = \begin{cases} \frac{S_X^2}{(x - m_X)^2}, & x < m_X + S_X; \\ 1, & x \geq m_X + S_X, \end{cases}$$

где  $m_X$  — математическое ожидание случайной величины  $X$ ;  $S_X$  — среднее квадратическое отклонение (стандарт) случайной величины  $X$ .

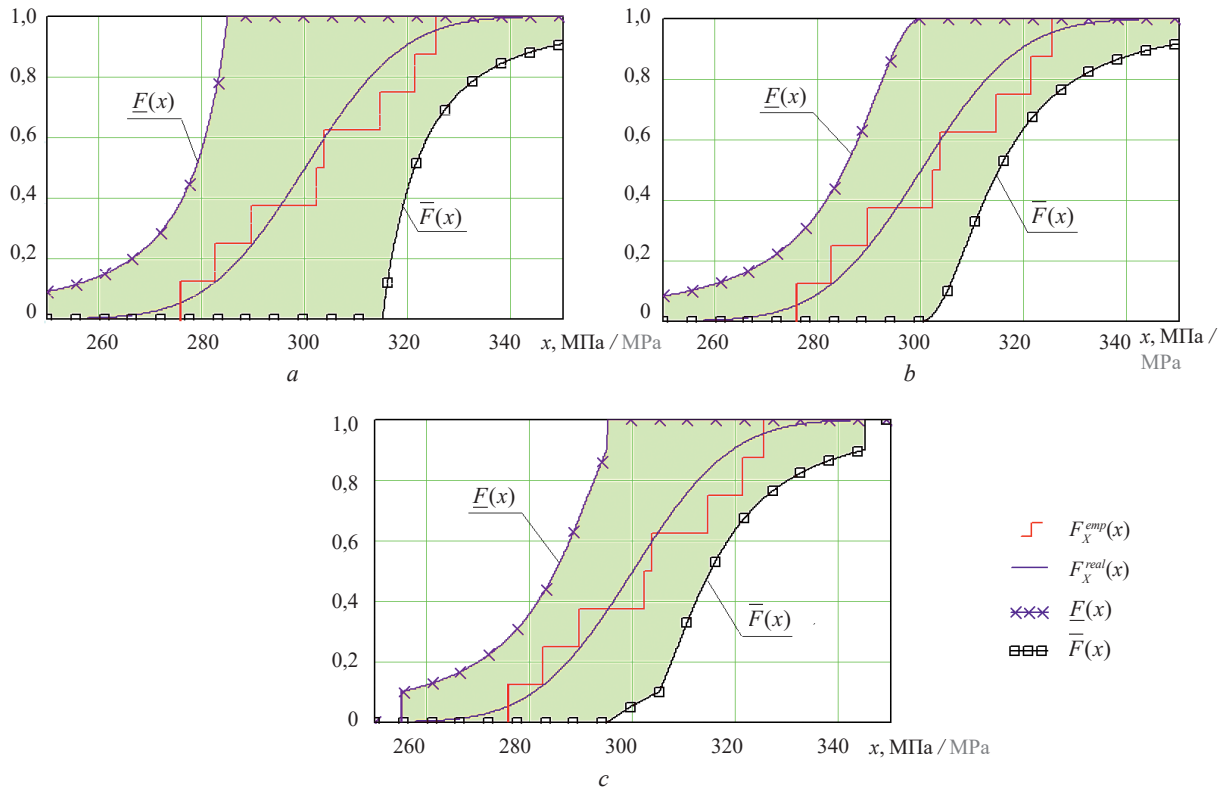
В исследовании [60] представлен аналогичный подход к построению границ р-блока, но уже на основе неравенства Кантелли.

В трудах [19, 61] предложены следующие граничные функции распределения, полученные на основе неравенства Чебышева:

$$\underline{F}_X(x) = \begin{cases} \frac{S_X^2}{(m_X - x)^2 + S_X^2}, & \text{если } x < m_X; \\ 1, & \text{если } x \geq m_X, \end{cases}$$

$$\bar{F}_X(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < m_X; \\ 1 - \frac{m_X}{x}, & \text{если } m_X \leq x \leq m_X + \frac{S_X^2}{m_X}; \\ \frac{(m_X - x)^2}{(m_X - x)^2 + S_X^2}, & \text{если } x > m_X + \frac{S_X^2}{m_X}. \end{cases}$$

Если известны точные границы изменчивости случайной величины  $X$  в виде интервала  $[x, \bar{x}]$ , то можно построить более узкие граничные функции распределения вероятностей [62] с аналитическим видом:



**Рис. 4.** Различные варианты р-блоков на основе неравенства Чебышева: *a* — граничные функции по [59]; *b* — граничные функции по [61]; *c* — граничные функции по [62]

**Fig. 4.** Different cases of p-boxes based on the Chebyshev inequality: *a* — Boundary functions pursuant to [59]; *b* — Boundary functions pursuant to [61]; *c* — Boundary functions pursuant to [62]

$$\bar{F}_X(x) = \begin{cases} 0, & x \leq m_X + S_X^2 / (m_X - \bar{x}); \\ 1 - [b(1+a) - c - b^2] / a, & m_X + S_X^2 / (m_X - \bar{x}) < x < m_X + S_X^2 / (m_X - \underline{x}); \\ 1 / [1 + S_X^2 / (x - m_X)^2], & m_X + S_X^2 / (m_X - \underline{x}) < x < \bar{x}; \\ 1, & x \geq \bar{x}, \end{cases}$$

$$\underline{F}_X(x) = \begin{cases} 0, & x \leq \underline{x}; \\ 1 / [1 + (x - m_X)^2 / S_X^2], & \underline{x} < x < m_X + S_X^2 / (m_X - \bar{x}); \\ 1 - (b^2 - ab + c) / (1 - a), & m_X + S_X^2 / (m_X - \bar{x}) < x < m_X + S_X^2 / (m_X - \underline{x}); \\ 1, & x \geq m_X + S_X^2 / (m_X - \underline{x}), \end{cases}$$

где  $x \in [\underline{x}, \bar{x}]$ , параметры распределения вычисляются следующим образом:  $a = (x - \underline{x}) / (\bar{x} - \underline{x})$ ,  $b = (m_X - \underline{x}) / (\bar{x} - \underline{x})$  и  $c = S_X^2 / (\bar{x} - \underline{x})^2$ .

На рис. 4 показаны различные варианты р-блоков для рассматриваемого примера на основе вышеописанных граничных функций распределения  $\underline{F}_X(x)$  и  $\bar{F}_X(x)$ .

Как видно из рис. 4, р-блок на базе граничных функций распределения вероятностей по [59] имеет широкую область допустимых распределений вероятностей. Р-блок по [61] имеет более узкие границы, которые покрывают эмпирическую функцию распределения и реальную функцию распределения вероятностей. При дополнительной информации в виде возможных границ случайной величины  $x \in [\underline{x}, \bar{x}]$  можно получить еще более узкие границы по [62]. Такой вариант возможен при организации входного строительного контроля или контроля допусков по исполнительной документации.

Преимуществом моделей на основе неравенства Чебышева является отсутствие необходимости подбирать закон распределения вероятностей случайных величин или назначать уровень среза (риска), как в случае с функцией распределения возможностей. Однако должны быть известны значения математического ожидания  $m_X$  и среднеквадратического отклонения  $S_X$  случайной величины. Использование выборочных оценок, например среднего арифметического выборки, может привести к ошибкам в результатах расчета надежности (см. рис. 1).

Для решения этой проблемы могут быть применены доверительные интервалы для математического ожидания  $m_X \in [m_X; \bar{m}_X]$  и для стандартного отклонения  $S_X \in [S_X; \bar{S}_X]$ , а сам р-блок будет формироваться множеством вариантов граничных функций по данным параметрам.

**Границы Колмогорова – Смирнова.** Одним из эффективных вариантов построения р-блока при ограниченной статистической информации является р-блок, построенный по границам статистики Колмогорова – Смирнова [63]. Преимущество такого подхода перед предыдущими — отсутствие необходимости иметь априорную информацию о функции

распределения случайной величины, а также отсутствие необходимости проводить оценку математического ожидания и среднеквадратического отклонения.

В исследовании [63] предлагается следующий вариант граничных функций  $\underline{F}_X(x) < F_X(x) < \bar{F}_X(x)$  распределения вероятностей:

$$\bar{F}_X(x) = \max(F_X^{emp}(x) - d_{n, 1-\gamma}, 0),$$

$$\underline{F}_X(x) = \min(F_X^{emp}(x) + d_{n, 1-\gamma}, 1),$$

где  $F_X^{emp}(x)$  — эмпирическая функция распределения вероятностей;  $d_{n, 1-\gamma}$  — значение статистики Колмогорова – Смирнова.

Параметр  $d_{n, 1-\gamma}$  может быть вычислен как  $d_{n, 1-\gamma} \approx k_{1-\gamma} / \sqrt{n}$  при числе испытаний/измерений  $n > 10$ . При числе испытаний/измерений менее 10, параметр  $d_{n, 1-\gamma}$  вычисляется по формуле [64]:

$$d_{n, 1-\gamma} \approx k_{1-\gamma} (\sqrt{n} + 0,12 + 0,11/\sqrt{n})^{-1}.$$

На рис. 5 приведены графики граничных функций распределения вероятностей, формирующих р-блок по вышеприведенным данным.

Недостаток рассматриваемого р-блока — постоянный уровень вероятности  $d_{n, 1-\gamma} \approx k_{1-\gamma} (\sqrt{n} + 0,12 + 0,11/\sqrt{n})^{-1}$  на хвостах реальных распределений. При малом числе испытаний или измерений  $n$  вероятности будут довольно высокими, на их основе трудно принимать решения об уровне безопасности объекта, так как оценка получается неинформативной. Например, при эксплуатационном напряжении 340 МПа по данным вышерассмотренного примера, надежность составит [0,59; 1].

Об оптимизации выбора функции распределения вероятностей по данному р-блоку подробная информация приведена в исследовании [65].

**Теория свидетельств Демпстера – Шефера.** Теория Демпстера – Шефера или теория случайных множеств была предложена в работе Артура Демпстера [66] и позднее развита в исследовании Гленна Шефера [67] в качестве инструмента для моделирования и обработки неточных (интервальных) экспертных оценок, измерений или наблюдений.

Случайное множество — это случайная величина, принимающая в качестве значений некоторые множества вместо точек.

Предположим, что  $N$  наблюдений или измерений элемента  $w \in \Omega$  было получено в качестве информации об объекте. При этом результат измерений является неточным, т.е. представляет собой некоторый интервал (подмножество)  $A$  значений  $\Omega$ . Пусть  $c_i$  означает количество наблюдаемых подмножеств  $A_i \in \Omega$ . Согласно [66], базовая вероятность может быть получена как  $m(A_i) = c_i/N$ . Если  $m(A_i) \geq 0$ , т.е. подмножество  $A_i$  в качестве результата измерения было получено хотя бы один раз, то  $A_i$  называется фокальным элементом (focal element).

Случайная величина в рамках теории свидетельств Демпстера – Шефера может быть представлена в виде двух граничных функций — функции доверия  $Bel(A)$  и функции правдоподобия  $Pl(A)$ :

$$Bel(A) = \sum_{A_i: A_i \subseteq A} m(A_i),$$

$$Pl(A) = \sum_{A_i: A_i \cap A \neq \emptyset} m(A_i).$$

В соответствии с работой [31], на основе функций доверия и правдоподобия можно построить граничные функции распределения вероятностей в р-блоке:

$$\underline{F}_X(x) = \begin{cases} \sum_{i: \sup A_i \leq x} c_i/N, & x < \Omega^*; \\ 1, & x = \Omega^*, \end{cases}$$

$$\overline{F}_X(x) = \begin{cases} \sum_{i: \inf A_i \leq x} c_i/N, & x > \Omega_*; \\ 0, & x = \Omega_*, \end{cases}$$

где  $\Omega_*$  и  $\Omega^*$  — нижняя и верхняя границы подмножества действительных чисел.

Теория свидетельств Демпстера – Шефера в задачах анализа надежности строительных конструкций зачастую применяется для моделирования случайной величины, которая представлена подмножеством интервальных значений:

$\{([y_1, z_1], m_1), ([y_2, z_2], m_2), \dots, ([y_n, z_n], m_n)\}$ ,  
 $m_n$  — базовая вероятность интервала. Тогда граничные функции распределения могут быть записаны в следующем виде:

$$\overline{F}_X(x) = \sum_{y_i \leq x} m_i,$$

$$\underline{F}_X(x) = \sum_{z_i \leq x} m_i.$$

Одним из недостатков функций распределения вероятностей в данном р-блоке является то, что функция доверия или правдоподобия принимает значения в виде единицы после значений  $y_i$  и  $z_i$ , когда  $\sum m_i = 1$ . Следовательно, в задачах анализа надежности возможен случай нулевой вероятности отказа, что не соответствует действительности.

Эта проблема возникает вследствие полной степени доверия к подмножеству интервалов. Для ее решения в исследованиях [31, 68] предлагается развитие функций доверия и правдоподобия путем использования обобщенной модели Дирихле [31, 69] как одного из видов робастных моделей. В этом случае верхнюю и нижнюю границы вероятности безотказной работы можно записать в виде:

$$\underline{P}(A|c,s) = \frac{NBel(A)}{N+s} = \chi Bel(A) \quad \text{и}$$

$$\overline{P}(A|c,s) = \frac{N \cdot Pl(A) + s}{N+s} = 1 - \chi [1 - Pl(A)],$$

где  $N$  — число испытаний (наблюдений);  $s$  — параметр, характеризующий меру «засорения», значением которого задаются, где введено обозначение  $\chi = (1 + s/N)^{-1}$  и  $\chi \in [0; 1]$ .

Коэффициент  $\chi$  учитывает степень доверия  $s$  к экспертным оценкам в виде подмножества интервалов, а также к количеству интервалов  $N$  в подмножестве, что позволяет в итоге получить более объективную оценку надежности.

В труде [70] изучается развитие теории свидетельств Демпстера – Шефера в контексте теории выпуклых множеств (convex sets) для оценки надежности элементов строительных конструкций в случае представления случайных величин в интервальной форме. Предлагаемый алгоритм рассматривается на примере численного анализа надежности консольной фермы по критерию ее прогиба. Разработан новый метод расчета надежности на основе методологии поверхности отклика (response surface) с использованием положений теории свидетельств Демпстера – Шефера [71].

Полный обзор современного состояния и проблем использования теории свидетельств Демпстера – Шефера при анализе надежности элементов строительных конструкций и инженерных сооружений приведен в актуальном исследовании 2021 г. [72].

**Байесовский подход.** Пусть имеется некоторая случайная величина  $X$ , которая характеризуется функцией распределения вероятностей  $F_X(x|\theta)$  и  $f_X(x|\theta)$  плотностью распределения вероятностей с параметрами  $\theta$ . Но  $\theta$  также является случайной величиной, имеющей некоторое распределение вероятностей. Такое распределение  $Pr(\theta)$  называется априорным распределением вероятностей, поскольку оно принимается прежде, чем были получены статистические данные. На основе априорного распределения  $Pr(\theta)$  формируется апостериорное распределение  $Pr(\theta)$ , при условии, что были получены данные  $x$ .

Вместо использования байесовского апостериорного прогностического распределения в труде [12] рассматриваются границы распределений, параметры которых попадают в определенную область. Чтобы достичь таких границ, выбирается

подмножество  $\Theta_s(\alpha) \in \Theta$  при выполнении условия  $1 - \alpha \leq P(\theta \in \Theta_s(\alpha))$ .

Зависимость апостериорных вероятностей от априорных вероятностей показывает, как много информации о значениях неизвестного параметра содержится в статистических данных. Если апостериорные вероятности сильно зависят от априорных, то, скорее всего, данные содержат мало информации. Если апостериорные вероятности слабо зависят от выбора априорного распределения, то данные являются информативными.

Таким образом, при использовании байесовского подхода, кроме распределения вероятностей рассматриваемой случайной величины, предполагается использование некоторого априорного распределения параметров функции распределения случайной величины. Опираясь на статистические данные, априорное распределение параметров модифицируется путем умножения на функцию правдоподобия, а результатом модификации служит апостериорное распределение параметров. То есть в задачах присутствует неопределенность второго порядка: «случайные параметры случайной величины» или «распределение параметров распределения» [31].

Формирование р-блоков для расчета надежности элементов строительных конструкций с использованием байесовского подхода рассмотрено в исследовании [73]. Аспекты применения байесовского подхода в задачах оценки надежности механических систем при недостатке статистической информации изучены в работе [74].

Отдельные аспекты применения байесовского подхода в задачах анализа надежности элементов строительных конструкций приведены в работах [75–77].

**Численное моделирование.** Основной подход к численному моделированию случайных величин и последующему анализу надежности строительных конструкций основывается на генерации случайных чисел методами Монте-Карло. Общая идея оценки надежности заключается в следующем: пусть имеется функция предельного состояния элемента  $g(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq 0$ , где  $X_1, X_2, \dots, X_n$  — случайные величины, входящие в функцию предельного состояния. Вероятность отказа можно вычислить по формуле:

$$p_f = \Pr [g(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq 0] = \iint_{g(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq 0} \dots \int f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n,$$

где  $f_X(x)$  — функция плотности вероятности случайной величины  $X$ .

Методы Монте-Карло позволяют получить оценку вероятности отказа в следующем виде:

$$p_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n I(X_1, X_2, \dots, X_n),$$

где  $I(X_1, X_2, \dots, X_n)$  — функция, определяемая как:

$$I(X_1, X_2, \dots, X_n) = \begin{cases} 1, & \text{если } g(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq 0; \\ 0, & \text{если } g(X_1, X_2, \dots, X_n) > 0. \end{cases}$$

В исследовании [78] рассматривается методика оценки надежности путем численного моделирования случайных величин по методу Монте-Карло, в случае, когда статистические параметры случайных величин характеризуются интервалами. Важным преимуществом такой методики является возможность ее практического использования, так как при оценке статистических параметров по выборочной совокупности данных мы получаем их интервальные, а не точные, оценки.

Для проведения анализа надежности с помощью р-блоков предложены методы, основанные на сэмплировании данных [79]. Однако сэмплирование выборки р-блоков требует большого количества выборок, что увеличивает вычислительные затраты, потому что каждое моделирование включает в себя интервальный анализ. В исследовании [79] предлагается интервальная методология квази-Монте-Карло моделирования для эффективного вычисления интервальных границ вероятностей отказа строительных конструкций. Методология основана на детерминированных последовательностях с низким расхождением (low-discrepancy sequence), которые распределяются более регулярно, чем (псевдослучайные) случайные точки при прямом моделировании методом Монте-Карло. Разработан метод оценки надежности на основе моделирования Монте-Карло при наличии случайных величин с точными и интервальными параметрами [80]. Алгоритм использования предложенного метода рассмотрен при анализе надежности стержневых систем.

Более подробную информацию о современном состоянии подходов к расчету надежности строительных конструкций с использованием генерации случайных данных при неполной статистической информации можно найти в работах [81, 82].

**Перспективы развития моделей случайных величин: метамоделирование, суррогатные модели, нейросетевые и генетические алгоритмы.** Одна из проблем анализа надежности строительных конструкций — высокая степень нелинейности математических моделей предельных состояний в отдельных задачах. Современные вычислительные комплексы позволяют оперативно их решать в детерминистической постановке, однако для стохастической постановки задачи могут потребоваться как серьезные вычислительные мощности (или затраты времени), так и эффективные алгоритмы расчета надежности. Особую важность приобретает точность оценки надежности, поскольку в строительной практике приходится иметь дело с крайне низкими значениями вероятностей отказа или высокими зна-

чениями вероятностей безотказной работы элементов строительных конструкций. Неточности и округления в оценке надежности отдельных элементов конструкций по отдельным критериям предельных состояний приведут к большим ошибкам при анализе надежности зданий и сооружений в целом как механических систем.

С целью оптимизации временных и вычислительных затрат на численное моделирование суррогатные модели были адаптированы для анализа надежности строительных конструкций. Два наиболее часто встречающихся подхода для построения суррогатных моделей в задачах анализа надежности строительных конструкций: кригинг [83–85] и модель разложения полиномиального хаоса [86].

В публикации [87] исследуется использование трех методов (модернизированного метода Монте-Карло, модель интервального предсказания и адаптивный кригинг) для анализа надежности высоко нелинейных математических моделей. Отмечается, что модернизированные методы Монте-Карло сами по себе бывают недостаточны для выполнения точных вычислений вероятности отказа в высоко нелинейных математических моделях, что часто приводит к большим вычислительным затратам. Это требует применения надежных процедур суррогатного моделирования. Интервальные модели предсказаний всегда обеспечивают достоверную оценку вероятности отказа, однако при рассмотрении малых вероятностей отказа, границы предсказаний (прогноза) становятся неинформативно большими, особенно это касается небольших выборок. Разработка высокоэффективных подходов к выполнению инженерных вычислений с неточными вероятностями, представленными в виде р-блоков, — быстро расширяющаяся область научных исследований [88]. По результатам анализа [88] делается вывод, что за последние 5 лет появилось много высокоэффективных подходов к вычислениям с неточными вероятностями в целом и р-блоками в частности. Основная задача на данный момент заключается в том, чтобы перевести этот набор высокоэффективных методов в прикладные инженерные применения, включающие мультифизические модели и/или модели с миллионами степеней свободы.

Созданы нейросетевые алгоритмы для построения р-блоков случайных величин на основе суррогатных моделей [89]. Приводится сравнение классического метода Монте-Карло и метода искусственных нейронных сетей для расчета надежности стальных рам как упругопластических систем [90]. Отмечается, что применение нейронных сетей позволяет практически устранить любые ограничения на масштаб задачи и размер выборки, используемые для методов Монте-Карло. Подробный анализ и обзор существующих алгоритмов на основе нейрон-

ных сетей для расчета надежности стальных конструкций рассмотрен в труде [91].

Для того чтобы определить точную и «достоверную» вероятностную модель, потребуется очень большое количество данных (возможно, бесконечное) [92]. К сожалению, недостаток информации всегда влияет на инженерный анализ надежности и безопасности, и его масштабы «априори не поддаются количественной оценке» [92]. В целом качество имеющейся информации зависит от контекста и сферы охвата, например, различные показатели эффективности систем могут по-разному реагировать на один и тот же недостаток данных. Предложенная в работе [92] структура представляет способ оценки дефицита данных путем сравнения оценок надежности системы (полученных с помощью обобщенных вероятностных подходов) с однозначными вероятностными показателями (полученными с использованием классических вероятностных методов). Если недостаток знаний незначителен, то надежность системы приведет к относительно узким границам, включающим точечную оценку надежности. В этом случае классические подходы будут хорошо подходить для решения проблемы анализа надежности.

Перспективными направлениями дальнейшего развития подходов к анализу надежности строительных конструкций также являются учет факторов деградации материалов и факторов времени [93–96], использование генетических алгоритмов [97, 98], комбинация с методами топологической оптимизации [99–101] и др.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В научной обзорной статье исследовано развитие вероятностных моделей случайных величин для расчетов надежности строительных конструкций при неполной (ограниченной) статистической информации о контролируемых параметрах. Разделы обзорной статьи сопровождаются графиками моделей случайных величин на основе одинаковой выборки статистических данных, что позволяет более объективно и наглядно сравнить различные подходы.

Выбор вероятностной модели случайной величины для дальнейшего расчета надежности элементов строительных конструкций будет зависеть от количества и типа полученной статистической информации о случайной величине.

Перспективным и актуальным направлением развития вероятностных моделей случайных величин и методов анализа надежности строительных конструкций при неполной статистической информации является использование численных методов моделирования с использованием суррогатных моделей (кригинг, байесовские сети и др.) и нейросетевых алгоритмов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Schwarz W. No interpretation of probability // Erkenntnis. 2018. Vol. 83. Issue 6. Pp. 1195–1212. DOI: 10.1007/s10670-017-9936
2. Кургузов К.В., Фоменко И.К., Шубина Д.Д. Вероятностно-статистическое моделирование нагрузок и воздействий // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 9. С. 1249–1261. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1249-1261
3. Schobi R., Sudret B. Structural reliability analysis for p-boxes using multi-level meta-models // Probabilistic Engineering Mechanics. 2017. Vol. 48. Pp. 27–38. DOI: 10.1016/j.probengmech.2017.04.001
4. Дудина И. В., Жержева С.А. Применение прикладных методов теории надежности в строительном проектировании // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2016. Т. 1. С. 117–121.
5. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 8. С. 30–33.
6. Yang M., Zhang D., Han X. New efficient and robust method for structural reliability analysis and its application in reliability-based design optimization // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2020. Vol. 366. P. 113018. DOI: 10.1016/j.cma.2020.113018
7. Xin T., Zhao J., Cui C., Duan Y. A non-probabilistic time-variant method for structural reliability analysis // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. 2020. Vol. 234 (5). Pp. 664–675. DOI: 10.1177/1748006X20928196
8. Liu J., Meng X., Xu C., Zhang D., Jiang C. Forward and inverse structural uncertainty propagations under stochastic variables with arbitrary probability distributions // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2018. Vol. 342. Pp. 287–320. DOI: 10.1016/j.cma.2018.07.035
9. Der Kiureghian A., Ditlevsen O. Aleatory or epistemic? Does it matter? // Structural safety. 2009. Vol. 31. Issue 2. Pp. 105–112. DOI: 10.1016/j.strusafe.2008.06.020
10. Lindley D. The philosophy of statistics // Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician). 2000. Vol. 49. Pp. 293–337. DOI: 10.1111/1467-9884.00238
11. Faber M.H. On the treatment of uncertainties and probabilities in engineering decision analysis // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2005. Vol. 127 (3). Pp. 243–248. DOI: 10.1115/1.1951776.
12. Montgomery V. New statistical methods in risk assessment by probability bounds. Diss. Durham University, 2009. 152 p.
13. Ditlevsen O., Madsen H.O. Proposal for a code for the direct use of reliability methods in structural design. JCSS Working Document, 1989. 28 p.
14. Zhang L., Zhang J., You L., Zhou S. Reliability analysis of structures based on a probability-uncertainty hybrid model // Quality and Reliability Engineering International. 2019. Vol. 35 (1). Pp. 263–279. DOI: 10.1002/qre.2396
15. Jiang C., Zheng J., Ni B.Y., Han X. A probabilistic and interval hybrid reliability analysis method for structures with correlated uncertain parameters // International Journal of Computational Methods. 2015. Vol. 12 (4). P. 1540006. DOI: 10.1142/S021987621540006X
16. Matheron G. Estimating and choosing. Berlin : Springer Verlag, 1989. 141 p. DOI: 10.1007/978-3-642-48817-7
17. Popper K.R. The logic of scientific discovery. London : Hutchinson, 1959. 480 p.
18. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural reliability methods. NY : J. Wiley & Sons, 1996. 372 p.
19. Ярыгина О.В. Методы расчета надежности железобетонных конструкций в составе зданий и сооружений при ограниченной статистической информации : дис. ... канд. техн. наук. Вологда, 2013. 157 с.
20. Уткин В.С., Редькин А.Н. Расчет надежности стальной балки с гибкой стенкой по критерию прочности стенки при ограниченной статистической информации с использованием распределений, полученных на основе неравенства Чебышева // Строительство и реконструкция. 2011. № 5 (37). С. 56–62.
21. Ferson S., Kreinovich V., Grinburg L., Myers D., Sentz K. Constructing probability boxes and Dempster-Shafer structures (Issue SAND-2015-4166J). Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States). 2015.
22. Walley P., Fine T.L. Towards a frequentist theory of upper and lower probability // Annals of Statistics. 1982. Issue 10. Pp. 741–761.
23. Williamson R.C., Downs T. Probabilistic arithmetic I: numerical methods for calculating convolutions and dependency bounds // International Journal of Approximate Reasoning. 1990. Issue 4. Pp. 89–158. DOI: 10.1016/0888-613X(90)90022-T
24. Boole G. An investigation of the laws of thought, on which are founded the mathematical theories of logic and probability. London : Walton and Maberly, 1854. 425 p.
25. Соловьева А.А., Соловьев С.А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 2. С. 153–167. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.153-167

26. Karanki D.R., Kushwaha H.S., Verma A.K., Ajit S. Uncertainty analysis based on probability bounds (p-box) approach in probabilistic safety assessment // Risk Analysis: An International Journal. 2009. Vol. 29 (5). Pp. 662–675. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2009.01221.x
27. Xiao N.C., Huang H.Z., Wang Z., Pang Y., He L. Reliability sensitivity analysis for structural systems in interval probability form // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2011. Vol. 44. Issue 5. Pp. 691–705. DOI 10.1007/s00158-011-0652-9
28. Hall J.W. Uncertainty-based sensitivity indices for imprecise probability distributions // Reliability Engineering & System Safety. 2006. Vol. 91 (10–11). Pp. 1443–1451. DOI: 10.1016/j.res.2005.11.042
29. Zhang H., Mullen R.L., Muhanna R.L. Structural analysis with probability-boxes // International Journal of Reliability and Safety. 2012. Vol. 6. Issue 1–3. Pp. 110–129. DOI: 10.1504/IJRS.2012.044292
30. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and control. 1965. Vol. 8. Pp. 338–353.
31. Уткин Л.В. Анализ риска и принятие решений при неполной информации. СПб. : Наука, 2007. 404 с.
32. Zadeh L.A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility // Fuzzy sets and systems. 1978. Vol. 1. Pp. 3–28.
33. Dubois D., Prade H. Possibility theory and its applications: Where do we stand? // Springer handbook of computational intelligence. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015. Pp. 31–60. DOI: 10.1007/978-3-662-43505-2\_3
34. Адичев В.В., Шмаков Д.С. Метод построения функции принадлежности с «прямой» обработкой исходных данных // Тр. Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). 2013. Т. 16. № 2 (56). С. 45–66.
35. Кашеварова Г.Г., Фурсов М.Н., Тонков Ю.Л. О построении функций принадлежности нечеткого множества в контексте задачи диагностики повреждений железобетонных плит // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2014. Т. 10. № 2. С. 93–101.
36. Shiraishi N., Furuta H. Reliability analysis based on fuzzy probability // Journal of Engineering Mechanics. 1983. Vol. 109. Issue 6. Pp. 1445–1459. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1983)109:6(1445)
37. Wang G., Wang W. Fuzzy reliability analysis of aseismic structures // Acta mechanica sinica. 1986. Vol. 2. Issue 4. Pp. 322–332.
38. Xiang Z. Fuzzy possibility analysis for reliability of crack resistance in steel fiber reinforced concrete members // Industrial Construction. 1991. Vol. 4. Issue 10. Pp. 3–6.
39. Tie-Yu T. Fuzzy possibility analysis for the reliability of the crack resistance in reinforced concrete members // Journal of Wuhan University of Technology. 1986. Vol. 8. Issue 3. Pp. 331–337.
40. Ji-Min C.X.Y. Reliability analysis of non-uniform settlement of foundation // Chinese Journal of Geotechnical Engineering S. 1992. Vol. 1.
41. Derong X.S.Z. Loading capability fuzzy reliability analysis of the bridge // Journal of Chongqing Jiaotong University. 1991. Vol. 3.
42. Уткин В.С., Уткин Л.С. Определение надежности строительных конструкций: учебное пособие. Вологда : Вологодский государственный технический университет, 2000. 166 с.
43. Уткин В.С., Соловьев С.А. Расчет надежности железобетонной балки на стадии эксплуатации по критерию длины трещины в бетоне // Вестник МГСУ. 2016. № 1. С. 68–79. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.1.68-79
44. Уткин В.С., Шепелина Е.А. Расчет надежности оснований фундаментов по критерию прочности при ограниченной информации о нагрузке // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 1 (36). С. 48–56. DOI: 10.5862/MCE.36.6
45. Уткин В.С., Каберова А.А., Соловьев С.А. Расчет надежности основания фундамента, сложенного просадочными грунтами, по критерию деформации // Геотехника. 2016. № 3. С. 18–25.
46. Уткин В.С., Каберова А.А., Соловьев С.А. Расчет надежности грунтовых оснований зданий и сооружений по несущей способности при реконструкции // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016. № 3. С. 51–58.
47. Bing L., Meilin Z., Kai X. A practical engineering method for fuzzy reliability analysis of mechanical structures // Reliability Engineering & System Safety. 2000. Vol. 67. Issue 3. Pp. 311–315. DOI: 10.1016/S0951-8320(99)00073-3
48. Jiang Q., Chen C.H. A numerical algorithm of fuzzy reliability // Reliability Engineering & System Safety. 2003. Vol. 80. Issue 3. Pp. 299–307. DOI: 10.1016/S0951-8320(03)00055-3
49. Hongzhong H. Fuzzy reliability analysis of generalized static strength of mechanical structure based on fuzzy failure criterion // Journal of Mechanical Strength. 2000. Vol. 1.
50. Shu-Xiang G., Zhen-Zhou L. Procedure for computing the possibility and fuzzy probability of failure of structures // Applied Mathematics and Mechanics. 2003. Vol. 24. Issue 3. Pp. 338–343. DOI: 10.1007/BF02438271
51. Байбурун А.Х. Оценка качества строительства при недостатке информации // Архитектура, градостроительство и дизайн. 2018. № 3 (17). С. 17–22.
52. Соколов В.А. Диагностика технического состояния конструкций зданий и сооружений с использованием методов теории нечетких множеств //

Инженерно-строительный журнал. 2010. № 5 (15). С. 31–37.

53. Яловая Ю.С. Оценивание технического состояния конструкции по результатам натуральных наблюдений с использованием теории размытых множеств // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия Строительство и архитектура. 2013. № 1 (79). С. 45–48.

54. Латидус А.А., Макаров А.Н. Теория нечетких множеств на этапах моделирования организации строительных процессов возведения многоэтажных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 6. С. 66–71.

55. Теличенко В.И. Принятие строительных решений с использованием элементов теории нечетких множеств // Теоретические основы строительства: сб. докл. российско-польского семинара, Москва, Варшава, 10–30 января 1996 г. М. ; Варшава : Изд-во АСВ, 1996. С. 319–324.

56. Юделевиц А.М. Системный подход к оценке надежности бетонных плотин // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2017. Т. 284. С. 82–88.

57. Кауфман Б.Д. Учет влияния неопределенных факторов при определении гидродинамического давления на плотину // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 9 (35). С. 59–69.

58. Кауфман Б.Д., Иванова Т.В., Шульман С.Г. Развитие методов оценки надежности гидротехнических сооружений // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2015. Т. 278. С. 15–22.

59. Oberuggenberger M., Fellin W. Reliability bounds through random sets: Non-parametric methods and geotechnical applications // Computers & Structures. 2008. Vol. 86 (10). Pp. 1093–1101. DOI: 10.1016/j.compstruc.2007.05.040

60. Troffaes M., Basu T. A Cantelli-type inequality for constructing nonparametric p-boxes based on exchangeability // Proceedings of Machine Learning Research. 2019. Vol. 103. Pp. 386–393.

61. Уткин Л.В., Уткин В.С., Редькин А.Н. Расчет надежности стальных рам по критерию устойчивости при многопараметрической нагрузке с использованием неравенства Чебышева // Надежность. 2011. № 3 (38). С. 42–52.

62. Zhang H., Dai H., Beer M., Wang W. Structural reliability analysis on the basis of small samples: an interval quasi-Monte Carlo method // Mechanical Systems and Signal Processing. 2013. Vol. 37 (1–2). Pp. 137–151. DOI: 10.1016/j.ymssp.2012.03.001

63. Kovalev M.S., Utkin L.V. A robust algorithm for explaining unreliable machine learning survival models using the Kolmogorov–Smirnov bounds // Neural Networks. 2020. Vol. 132. Pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.neunet.2020.08.007

64. Johnson N.L., Leone F. Statistics and experimental design in engineering and the physical sciences: Vol. 1. New York : Wiley, 1964. 523 p.

65. Utkin L.V., Coolen F.P.A. On reliability growth models using Kolmogorov–Smirnov bounds // International Journal of Performability Engineering. 2011. Vol. 7. Issue 1. Pp. 5–19. DOI: 10.1.1.1041.8408

66. Dempster A.P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping // The Annals of Mathematical Statistics. 1967. Vol. 38. Issue 2. Pp. 325–339

67. Shafer G. Dempster–Shafer theory // Encyclopedia of artificial intelligence. 1992. Vol. 1. Pp. 330–331.

68. Соловьев С.А. Методы расчетов надежности изгибаемых железобетонных элементов при ограниченной статистической информации : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2019. 181 с.

69. Bernard J.M. Analysis of local or asymmetric dependencies in contingency tables using the imprecise Dirichlet model // International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications. 2003. Pp. 46–62.

70. Zhang Z., Jiang C., Ruan X.X., Guan F.J. A novel evidence theory model dealing with correlated variables and the corresponding structural reliability analysis method // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2018. Vol. 57 (4). Pp. 1749–1764. DOI: 10.1007/s00158-017-1843-9

71. Zhang Z., Jiang C., Han X., Hu D., Yu S. A response surface approach for structural reliability analysis using evidence theory // Advances in Engineering Software. 2014. Vol. 69. Pp. 37–45. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.005

72. Zhang Z., Jiang C. Evidence-theory-based structural reliability analysis with epistemic uncertainty: a review // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2021. Pp. 1–19. DOI: 10.1007/s00158-021-02863-w

73. Utkin L.V., Kozine I. On new cautious structural reliability models in the framework of imprecise probabilities // Structural Safety. 2010. Vol. 32. Issue 6. Pp. 411–416. DOI: 10.1016/j.strusafe.2010.08.004

74. Wang P., Youn B.D., Xi Z., Kloess A. Bayesian reliability analysis with evolving, insufficient, and subjective data sets // Journal of Mechanical Design. 2009. Vol. 131 (11). DOI: 10.1115/1.4000251

75. Coolen F.P.A., Newby M.J. Bayesian reliability analysis with imprecise prior probabilities // Reliability Engineering & Systems Safety. 1994. Vol. 431. Pp. 75–85. DOI: 10.1016/0951-8320(94)90096-5

76. Huang H.Z., Zuo M.J., Sun Z.Q. Bayesian Reliability Analysis for Fuzzy Lifetime Data // Fuzzy Sets and Systems. 2006. Vol. 157. Pp. 1674–1686. DOI: 10.1016/j.fss.2005.11.009

77. *Youn B.D., Wang P.F.* Bayesian reliability-based design optimization using eigenvector dimension reduction method // *Structural Multidisciplinary Optimization*. 2008. Vol. 362. Pp. 107–123. DOI: 10.1007/s00158-007-0202-7
78. *Zhang H., Mullen R.L., Muhanna R.L.* Interval Monte Carlo methods for structural reliability // *Structural Safety*. 2010. Vol. 32. Issue 3. Pp. 183–190. DOI: 10.1016/j.strusafe.2010.01.001
79. *Zhang H., Dai H., Beer M., Wang W.* Structural reliability analysis on the basis of small samples: an interval quasi-Monte Carlo method // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. Vol. 37 (1–2). Pp. 137–151. DOI: 10.1016/j.ymsp.2012.03.001
80. *Gao W., Wu D., Song C., Tin-Loi F., Li X.* Hybrid probabilistic interval analysis of bar structures with uncertainty using a mixed perturbation Monte-Carlo method // *Finite Elements in Analysis and Design*. 2011. Vol. 47 (7). Pp. 643–652. DOI: 10.1016/j.finel.2011.01.007
81. *Echard B., Gayton N., Lemaire M.* AK-MCS: an active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo simulation // *Structural Safety*. 2011. Vol. 33. Issue 2. Pp. 145–154. DOI: 10.1016/j.strusafe.2011.01.002
82. *Jahani E., Muhanna R.L., Shayanfar M.A., Barkhordari M.A.* Reliability assessment with fuzzy random variables using interval Monte Carlo simulation // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2014. Vol. 29 (3). Pp. 208–220. DOI: 10.1111/mice.12028
83. *Ling C., Lu Z., Zhu X.* Efficient methods by active learning kriging coupled with variance reduction based sampling methods for time-dependent failure probability // *Reliability Engineering & Systems Safety*. 2019. Vol. 188. Pp. 23–35. DOI: 10.1016/j.ress.2019.03.004
85. *Angelikopoulos P., Papadimitriou C., Koumoutsakos P.* X-TMCMC: Adaptive kriging for Bayesian inverse modeling // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2015. Vol. 289. Pp. 409–428. DOI: 10.1016/j.cma.2015.01.015
86. *Marelli S., Sudret B.* An active-learning algorithm that combines sparse polynomial chaos expansions and bootstrap for structural reliability analysis // *Structural Safety*. 2018. Vol. 75. Pp. 67–74. DOI: 10.1016/j.strusafe.2018.06.003
87. *Faes M., Sadeghi J., Broggi M., De Angelis M., Patelli E., Beer M. et al.* On the robust estimation of small failure probabilities for strong nonlinear models // *ASCE-ASME journal of risk and uncertainty in engineering systems, part b: mechanical engineering*. 2019. Vol. 5 (4).
88. *Faes M., Daub M., Beer M.* Engineering analysis with imprecise probabilities: a state-of-the-art review on P-boxes // *Proceedings of the 7th Asia-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications*. University of Tokyo, 2020.
89. *Xiao N.C., Zhan H., Yuan K.* Adaptive sampling with neural networks for system reliability analysis // *2020 Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM)*. IEEE, 2020. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/APARM49247.2020.9209364
90. *Papadrakakis M., Papadopoulos V., Lagaros N.D.* Structural reliability analysis of elastic-plastic structures using neural networks and Monte Carlo simulation // *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 1996. Vol. 136. Issue 1–2. Pp. 145–163.
91. *Chojaczyk A.A., Teixeira A.P., Neves L.C., Cardoso J.B., Soares C.G.* Review and application of artificial neural networks models in reliability analysis of steel structures // *Structural Safety*. 2015. Vol. 52. Pp. 78–89.
92. *Rocchetta R., Broggi M., Patelli E.* Do we have enough data? Robust reliability via uncertainty quantification // *Applied Mathematical Modelling*. 2018. Vol. 54. Pp. 710–721.
93. *Jiang C., Ni B.Y., Han X., Tao Y.R.* Non-probabilistic convex model process: a new method of time-variant uncertainty analysis and its application to structural dynamic reliability problems // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2014. Vol. 268. Pp. 656–676. DOI: 10.1016/j.cma.2013.10.016
94. *Rozsas Á., Mogyorosi Z.* The effect of copulas on time-variant reliability involving time-continuous stochastic processes // *Structural Safety*. 2017. Vol. 66. Pp. 94–105. DOI: 10.1016/j.strusafe.2017.02.004
95. *Yao T.H.J., Wen Y.K.* Response surface method for time-variant reliability analysis // *Journal of Structural Engineering*. 1996. Vol. 122. Issue 2. Pp. 193–201. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:2(193)
96. *Yu S., Wang Z.* A novel time-variant reliability analysis method based on failure processes decomposition for dynamic uncertain structures // *Journal of Mechanical Design*. 2018. Vol. 140. Issue 5. P. 051401. DOI: 10.1115/1.4039387
97. *Bagheri M., Miri M., Shabakhty N.* Modeling of epistemic uncertainty in reliability analysis of structures using a robust genetic algorithm // *Iranian Journal of Fuzzy Systems*. 2015. Vol. 12. Issue 2. Pp. 23–40. DOI: 10.22111/IJFS.2015.1980
98. *Sreekanth J., Datta B.* Coupled simulation-optimization model for coastal aquifer management using genetic programming-based ensemble surrogate models and multiple-realization optimization // *Water Resources Research*. 2011. Vol. 47. Issue 4. DOI: 10.1029/2010WR009683
99. *Jalalpour M., Tootkaboni M.* An efficient approach to reliability-based topology optimization for continua under material uncertainty // *Structural and*

Multidisciplinary Optimization. 2016. Vol. 53. Issue 4. Pp. 759–772. DOI: 10.1007/s00158-015-1360-7

100. Wang L., Liu D., Yang Y., Wang X., Qiu Z. A novel method of non-probabilistic reliability-based topology optimization corresponding to continuum structures with unknown but bounded uncertainties // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2017. Vol. 326. Pp. 573–595. DOI: 10.1016/j.cma.2017.08.023

101. Khalaj M., Khalaj F., Khalaj A. A novel risk-based analysis for the production system under epistemic uncertainty // *Journal of Industrial Engineering International*. 2013. Vol. 9. Issue 1. Pp. 1–10. DOI: 10.1186/2251-712X-9-35

101. Khalaj M., Khalaj F., Khalaj A. A novel risk-based analysis for the production system under epistemic uncertainty // *Journal of Industrial Engineering International*. 2013. Vol. 9. Issue 1. Pp. 1–10. DOI: 10.1186/2251-712X-9-35

Поступила в редакцию 5 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 13 мая 2021 г.

Одобрена для публикации 13 мая 2021 г.

Об авторах: **Анастасия Андреевна Соловьева** — аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 1090512; solovevaaa@vogu35.ru;

**Сергей Александрович Соловьев** — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 821778, Scopus: 57191529586, ResearcherID: AAJ-1708-2020, ORCID: 0000-0001-7083-7963; solovevsa@vogu35.ru.

## REFERENCES

- Schwarz W. No interpretation of probability. *Erkenntnis*. 2018; 83(6):1195-1212.
- Kurguzov K.V., Fomenko I.K., Shubina D.D. Probabilistic and statistical modeling of loads and forces. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(9):1249-1261. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1249-1261 (rus.).
- Schobi R., Sudret B. Structural reliability analysis for p-boxes using multi-level meta-models. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2017; 48:27-38. DOI: 10.1016/j.probenmech.2017.04.001
- Dudina I.V., Zherzheva S.A. Application of applied methods of reliability theory in structural design. *Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*. 2016; 1:117-121 (rus.).
- Tamrazyan A.G. Concrete and reinforced concrete: problems and prospects. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 8:30-33. (rus.).
- Yang M., Zhang D., Han X. New efficient and robust method for structural reliability analysis and its application in reliability-based design optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2020; 366:113018. DOI: 10.1016/j.cma.2020.113018
- Xin T., Zhao J., Cui C., Duan Y. A non-probabilistic time-variant method for structural reliability analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2020; 234(5):664-675. DOI: 10.1177/1748006X20928196
- Liu J., Meng X., Xu C., Zhang D., Jiang C. Forward and inverse structural uncertainty propagations under stochastic variables with arbitrary probability distributions. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2018; 342:287-320. DOI: 10.1016/j.cma.2018.07.035
- Der Kiureghian A., Ditlevsen O. Aleatory or epistemic? Does it matter? *Structural safety*. 2009; 31(2):105-112. DOI: 10.1016/j.strusafe.2008.06.020
- Lindley D. The philosophy of statistics. *Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician)*. 2000; 49:293-337. DOI: 10.1111/1467-9884.00238
- Faber M.H. On the treatment of uncertainties and probabilities in engineering decision analysis. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2005; 127(3):243-248. DOI: 10.1115/1.1951776.
- Montgomery V. *New statistical methods in risk assessment by probability bounds*. Diss. Durham University, 2009; 152.
- Ditlevsen O., Madsen H.O. *Proposal for a code for the direct use of reliability methods in structural design*. JCSS Working Document, 1989; 28.
- Zhang L., Zhang J., You L., Zhou S. Reliability analysis of structures based on a probability-uncertainty hybrid model. *Quality and Reliability Engineering International*. 2019; 35(1):263-279. DOI: 10.1002/qre.2396
- Jiang C., Zheng J., Ni B.Y., Han X. A probabilistic and interval hybrid reliability analysis method for structures with correlated uncertain parameters. *International Journal of Computational Methods*. 2015; 12(4):1540006. DOI: 10.1142/S021987621540006X
- Matheron G. *Estimating and choosing*. Berlin, Springer Verlag, 1989; 141. DOI: 10.1007/978-3-642-48817-7
- Popper K.R. *The logic of scientific discovery*. London, Hutchinson, 1959; 480.

18. Ditlevsen O., Madsen H.O. *Structural reliability methods*. New York, J. Wiley & Sons, 1996; 372.
19. Yarygina O.V. Methods for calculating the reliability of reinforced concrete structures in buildings and structures with limited statistical information : diss. cand. of tech. sc. Vologda, 2013; 157. (rus.).
20. Utkin V.S., Redkin A.N. Calculation of the reliability of a steel beam with a flexible wall according to the wall strength criterion with limited statistical information using distributions obtained on the basis of the Chebyshev inequality. *Building and reconstruction*. 2011; 5(37):56-62. (rus.).
21. Ferson S., Kreinovich V., Grinzburg L., Myers D., Sentz K. *Constructing probability boxes and Dempster-Shafer structures (No. SAND-2015-4166J)*. Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States). 2015.
22. Walley P., Fine T.L. Towards a frequentist theory of upper and lower probability. *Annals of Statistics*. 1982; 10:741-761.
23. Williamson R.C., Downs T. Probabilistic arithmetic I: numerical methods for calculating convolutions and dependency bounds. *International Journal of Approximate Reasoning*. 1990; 4:89-158. DOI: 10.1016/0888-613X(90)90022-T
24. Boole G. *An Investigation of the Laws of Thought, On Which Are Founded the Mathematical Theories of Logic and Probability*. Walton and Maberly, London, 1854; 425.
25. Soloveva A.A., Solovev S.A. Reliability analysis of planar steel trusses based on p-box models. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(2):153-167. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.153-167 (rus.).
26. Karanki D.R., Kushwaha H.S., Verma A.K., Ajit S. Uncertainty analysis based on probability bounds (p-box) approach in probabilistic safety assessment. *Risk Analysis: An International Journal*. 2009; 29(5):662-675. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2009.01221.x
27. Xiao N.C., Huang H.Z., Wang Z., Pang Y., He L. Reliability sensitivity analysis for structural systems in interval probability form. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2011; 44(5):691-705. DOI 10.1007/s00158-011-0652-9
28. Hall J.W. Uncertainty-based sensitivity indices for imprecise probability distributions. *Reliability Engineering & System Safety*. 2006; 91(10-11):1443-1451. DOI: 10.1016/j.ress.2005.11.042
29. Zhang H., Mullen R.L., Muhanna R.L. Structural analysis with probability-boxes. *International Journal of Reliability and Safety*. 2012; 6(1-3):110-129. DOI: 10.1504/IJRS.2012.044292
30. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Information and control*. 1965; 8:338-353.
31. Utkin L.V. *Risk analysis and decision-making with incomplete information*. St. Petersburg, Nauka, 2007; 404. (rus.).
32. Zadeh L.A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*. 1978; 1:3-28.
33. Dubois D., Prade H. Possibility theory and its applications: Where do we stand? *Springer handbook of computational intelligence*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2015; 31-60. DOI: 10.1007/978-3-662-43505-2\_3
34. Adishchev V.V., Shmakov D.S. Method of constructing the membership function with "direct" processing of initial data. *Proceedings of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)*. 2013; 16(2):45-66. (rus.).
35. Kashevarova G.G., Fursov M.N., Tonkov Yu.L. On the construction of membership functions of a fuzzy set in the context of the problem of diagnosing damage to reinforced concrete slabs. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2014; 10(2):93-101. (rus.).
36. Shiraishi N., Furuta H. Reliability analysis based on fuzzy probability. *Journal of Engineering Mechanics*. 1983; 109(6):1445-1459. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1983)109:6(1445)
37. Wang G., Wang W. Fuzzy reliability analysis of aseismic structures. *Acta mechanica sinica*. 1986; 2(4):322-332.
38. Xiang Z. Fuzzy possibility analysis for reliability of crack resistance in steel fiber reinforced concrete members. *Industrial Construction*. 1991; 4(10):3-6.
39. Tie-Yu T. Fuzzy possibility analysis for the reliability of the crack resistance in reinforced concrete members. *Journal of Wuhan University of Technology*. 1986; 8(3):331-337.
40. Ji-Min C.X.Y. Reliability analysis of non-uniform settlement of foundation. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering S*. 1992; 1.
41. Derong X.S.Z. Loading capability fuzzy reliability analysis of the bridge. *Journal of Chongqing Jiaotong University*. 1991; 3.
42. Utkin V.S., Utkin L.S. *Reliability analysis of buildings and structures: a textbook*. Vologda, Vologda State Technical University, 2000; 166. (rus.).
43. Utkin V.S., Solovev S.A. Calculation of reinforced concrete beam reliability on operation stage by crack length criterion. *Vestnik MGSU [Vestnik Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 1:68-79. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.1.68-79 (rus.).
44. Utkin V.S., Shepelina E.A. Calculation of reliability of foundation beds according to the strength criterion with limited information about the load. *Magazine of Civil Engineering*. 2013; 1(36):48-56. DOI: 10.5862/MCE. 36.6 (rus.).
45. Utkin V.S., Kaberova A.A., Solovev S.A. Reliability calculation of a subfoundation consisting

of collapsible soils by the criterion of deformation. *Geotechnics*. 2016; 3:18-25. (rus.).

46. Utkin V.S., Kaberova A.A., Solovov S.A. Calculation of the reliability of the ground foundations of buildings and structures by the bearing capacity during reconstruction. *Earthquake Engineering. Construction Safety*. 2016; 3:51-58. (rus.).

47. Bing L., Meilin Z., Kai X. A practical engineering method for fuzzy reliability analysis of mechanical structures. *Reliability Engineering & System Safety*. 2000; 67(3):311-315. DOI: 10.1016/S0951-8320(99)00073-3

48. Jiang Q., Chen C.H. A numerical algorithm of fuzzy reliability. *Reliability Engineering & System Safety*. 2003; 80(3):299-307. DOI: 10.1016/S0951-8320(03)00055-3

49. Hongzhong H. Fuzzy reliability analysis of generalized static strength of mechanical structure based on fuzzy failure criterion. *Journal of Mechanical Strength*. 2000; 1.

50. Shu-Xiang G., Zhen-Zhou L. Procedure for computing the possibility and fuzzy probability of failure of structures. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2003; 24(3):338-343. DOI: 10.1007/BF02438271

51. Bayburin A.Kh. Evaluation of the quality of construction with a lack of information. *Architecture, urban planning and design*. 2018; 3(17):17-22. (rus.).

52. Sokolov V.A. Diagnostics of the technical condition of structures of buildings and structures using methods of the theory of fuzzy sets. *Magazine of Civil Engineering*. 2010; 5(15):31-37. (rus.).

53. Yalovaya Yu.S. Evaluation of the technical state of the structure based on the results of field observations using the theory of blurred sets. *Proceedings of the Brest State Technical University. Series: Natural and Engineering Science*. 2013; 1(79):45-48. (rus.).

54. Lapidus A.A., Makarov A.N. Fuzzy-set theory at modeling stages of organization processes of multi-storey buildings construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 6:66-71. (rus.).

55. Telichenko V.I. Adoption of construction decisions using elements of the theory of fuzzy sets. *Theoretical foundations of construction: collection of reports of the Russian-Polish seminar*. Moscow, Warsaw, ASV Publishing House, 1996; 319-324. (rus.).

56. Yudelevich A.M. A systematic approach to assessing the reliability of concrete dams. *Proceedings of the B.E. Vedenev All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering*. 2017; 284:82-88. (rus.).

57. Kaufman B.D. Accounting for the impact of uncertain factors on the determination of the hydrodynamic pressure on the dam. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 9(35):59-69. (rus.).

58. Kaufman B.D., Ivanova T.V., Shulman S.G. Development of methods for assessing the reliability of hydraulic structures. *Proceedings of the B.E. Ve-*

*denev All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering*. 2015; 278:15-22.

59. Oberguggenberger M., Fellin W. Reliability bounds through random sets: Non-parametric methods and geotechnical applications. *Computers & Structures*. 2008; 86(10):1093-1101. DOI: 10.1016/j.compstruc.2007.05.040

60. Troffaes M., Basu T. A Cantelli-type inequality for constructing nonparametric p-boxes based on exchangeability. *Proceedings of Machine Learning Research*. 2019; 103:386-393.

61. Utkin L.V., Utkin V.S., Redkin A.N. Calculation of steel frame reliability according to stability measure at multiparameter load using chebeshev's inequality. *Dependability*. 2011; 3(38):42-52. (rus.).

62. Zhang H., Dai H., Beer M., Wang W. Structural reliability analysis on the basis of small samples: an interval quasi-Monte Carlo method. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013; 37(1-2):137-151. DOI: 10.1016/j.ymsp.2012.03.001

63. Kovalev M.S., Utkin L.V. A robust algorithm for explaining unreliable machine learning survival models using the Kolmogorov–Smirnov bounds. *Neural Networks*. 2020; 132:1-18. DOI: 10.1016/j.neunet.2020.08.007

64. Johnson N.L., Leone F. *Statistics and experimental design in engineering and the physical sciences: Volume 1*. Wiley, New York, 1964; 523.

65. Utkin L.V., Coolen F.P.A. On reliability growth models using Kolmogorov-Smirnov bounds. *International Journal of Performability Engineering*. 2011; 7(1):5-19. DOI: 10.1.1.1041.8408

66. Dempster A.P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1967; 38(2):325-339.

67. Shafer G. Dempster-Shafer theory. *Encyclopedia of artificial intelligence*. 1992; 1:330-331.

68. Solovov S.A. *Methods for the reliability analysis of flexible reinforced concrete elements with limited statistical data: diss. cand. of tech. sc.* St. Petersburg, 2019; 181. (rus.).

69. Bernard J.M. Analysis of local or asymmetric dependencies in contingency tables using the Imprecise Dirichlet model. *International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications*. 2003; 46-62.

70. Zhang Z., Jiang C., Ruan X.X., Guan F.J. A novel evidence theory model dealing with correlated variables and the corresponding structural reliability analysis method. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2018; 57(4):1749-1764. DOI: 10.1007/s00158-017-1843-9

71. Zhang Z., Jiang C., Han X., Hu D., Yu S. A response surface approach for structural reliability analysis using evidence theory. *Advances in Engineering Software*. 2014; 69:37-45. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.005

72. Zhang Z., Jiang C. Evidence-theory-based structural reliability analysis with epistemic uncertainty: a review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2021; 1-19. DOI: 10.1007/s00158-021-02863-w
73. Utkin L.V., Kozine I. On new cautious structural reliability models in the framework of imprecise probabilities. *Structural Safety*. 2010; 32(6):411-416. DOI: 10.1016/j.strusafe.2010.08.004
74. Wang P., Youn B.D., Xi Z., Kloess A. Bayesian reliability analysis with evolving, insufficient, and subjective data sets. *Journal of Mechanical Design*. 2009; 131(11). DOI: 10.1115/1.4000251
75. Coolen F.P.A., Newby M.J. Bayesian reliability analysis with imprecise prior probabilities. *Reliability Engineering & Systems Safety*. 1994; 431:75-85. DOI: 10.1016/0951-8320(94)90096-5
76. Huang H.Z., Zuo M.J., Sun Z.Q. Bayesian reliability analysis for fuzzy lifetime data. *Fuzzy Sets and Systems*. 2006; 157:1674-1686. DOI: 10.1016/j.fss.2005.11.009
77. Youn B.D., Wang P.F. Bayesian reliability-based design optimization using eigenvector dimension reduction method. *Structural Multidisciplinary Optimization*. 2008; 362:107-123. DOI: 10.1007/s00158-007-0202-7
78. Zhang H., Mullen R.L., Muhanna R.L. Interval Monte Carlo methods for structural reliability. *Structural Safety*. 2010; 32(3):183-190. DOI: 10.1016/j.strusafe.2010.01.001
79. Zhang H., Dai H., Beer M., Wang W. Structural reliability analysis on the basis of small samples: an interval quasi-Monte Carlo method. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013; 37(1-2):137-151. DOI: 10.1016/j.ymsp.2012.03.001
80. Gao W., Wu D., Song C., Tin-Loi F., Li X. Hybrid probabilistic interval analysis of bar structures with uncertainty using a mixed perturbation Monte-Carlo method. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2011; 47(7):643-652. DOI: 10.1016/j.finel.2011.01.007
81. Echard B., Gayton N., Lemaire M. AK-MCS: an active learning reliability method combining Kriging and Monte Carlo simulation. *Structural Safety*. 2011; 33(2):145-154. DOI: 10.1016/j.strusafe.2011.01.002
82. Jahani E., Muhanna R.L., Shayanfar M.A., Barkhordari M.A. Reliability assessment with fuzzy random variables using interval Monte Carlo simulation. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2014; 29(3):208-220. DOI: 10.1111/micc.12028
83. Ling C., Lu Z., Zhu X. Efficient methods by active learning kriging coupled with variance reduction based sampling methods for time-dependent failure probability. *Reliability Engineering & Systems Safety*. 2019; 188:23-35. DOI: 10.1016/j.ress.2019.03.004
84. Angelikopoulos P., Papadimitriou C., Koumoutsakos P. X-TMCMC: Adaptive kriging for Bayesian inverse modeling. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2015; 289:409-428. DOI: 10.1016/j.cma.2015.01.015
85. Marelli S., Sudret B. An active-learning algorithm that combines sparse polynomial chaos expansions and bootstrap for structural reliability analysis. *Structural Safety*. 2018; 75:67-74. DOI: 10.1016/j.strusafe.2018.06.003
86. Faes M., Sadeghi J., Broggi M., De Angelis M., Patelli E., Beer M. et al. On the robust estimation of small failure probabilities for strong nonlinear models. *ASCE-ASME journal of risk and uncertainty in engineering systems, part b: mechanical engineering*. 2019; 5(4).
87. Faes M., Daub M., Beer M. Engineering analysis with imprecise probabilities: a state-of-the-art review on P-boxes. *Proceedings of the 7th Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications*. 2020.
88. Xiao N.C., Zhan H., Yuan K. Adaptive sampling with neural networks for system reliability analysis. *2020 Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM)*. IEEE. 2020; 1-5. DOI: 10.1109/APARM49247.2020.9209364
89. Papadrakakis M., Papadopoulos V., Lagaros N.D. Structural reliability analysis of elastic-plastic structures using neural networks and Monte Carlo simulation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1996; 136(1-2):145-163.
90. Chojaczyk A.A., Teixeira A.P., Neves L.C., Cardoso J.B., Soares C.G. Review and application of artificial neural networks models in reliability analysis of steel structures. *Structural Safety*. 2015; 52:78-89.
91. Rocchetta R., Broggi M., Patelli E. Do we have enough data? Robust reliability via uncertainty quantification. *Applied Mathematical Modelling*. 2018; 54:710-721.
92. Jiang C., Ni B.Y., Han X., Tao Y.R. Non-probabilistic convex model process: a new method of time-variant uncertainty analysis and its application to structural dynamic reliability problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2014; 268:656-676. DOI: 10.1016/j.cma.2013.10.016
93. Rozsas Á., Mogyorosi Z. The effect of copulas on time-variant reliability involving time-continuous stochastic processes. *Structural Safety*. 2017; 66:94-105. DOI: 10.1016/j.strusafe.2017.02.004
94. Yao T.H.J., Wen Y.K. Response surface method for time-variant reliability analysis. *Journal of Structural Engineering*. 1996; 122(2):193-201. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:2(193)
95. Yu S., Wang Z. A novel time-variant reliability analysis method based on failure processes decomposition for dynamic uncertain structures. *Journal of Mechanical Design*. 2018; 140(5):051401. DOI: 10.1115/1.4039387

97. Bagheri M., Miri M., Shabakhty N. Modeling of epistemic uncertainty in reliability analysis of structures using a robust genetic algorithm. *Iranian Journal of Fuzzy Systems*. 2015; 12(2):23-40. DOI: 10.22111/IJFS.2015.1980

98. Sreekanth J., Datta B. Coupled simulation-optimization model for coastal aquifer management using genetic programming-based ensemble surrogate models and multiple-realization optimization. *Water Resources Research*. 2011; 47(4). DOI: 10.1029/2010WR009683

99. Jalalpour M., Tootkaboni M. An efficient approach to reliability-based topology optimization for

continua under material uncertainty. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2016; 53(4):759-772. DOI: 10.1007/s00158-015-1360-7

100. Wang L., Liu D., Yang Y., Wang X., Qiu Z. A novel method of non-probabilistic reliability-based topology optimization corresponding to continuum structures with unknown but bounded uncertainties. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2017; 326:573-595. DOI: 10.1016/j.cma.2017.08.023

101. Khalaj M., Khalaj F., Khalaj A. A novel risk-based analysis for the production system under epistemic uncertainty. *Journal of Industrial Engineering International*. 2013; 9(1):1-10. DOI: 10.1186/2251-712X-9-35

Received March 5, 2021.

Adopted in revised form on May 13, 2021.

Approved for publication on May 13, 2021

BIONOTES: **Anastasia A. Soloveva** — postgraduate student of the Department of Industrial and Civil Engineering; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation; ID RISC: 1090512; solovevaa@vogu35.ru;

**Sergey A. Solovev** — Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering; **Vologda State University (VSU)**; 15 Lenin st., Vologda, 160000, Russian Federation; ID RISC: 821778, Scopus: 57191529586, ResearcherID: AAJ-1708-2020, ORCID: 0000-0001-7083-7963; solovevsa@vogu35.ru.

## Взаимодействие сваи большой длины с многослойным массивом грунта с учетом упругих и реологических свойств и упрочнения

З.Г. Тер-Мартirosян, А.С. Акулецкий

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** При залегании в основании слабых глинистых грунтов осадка здания может продолжаться в течение значительного времени. Важное значение при проектировании фундаментов на таких грунтах имеет прогноз осадок во времени. Поэтому подход к описанию процесса осадок фундаментов необходимо рассматривать как реологический. Рассмотрено решение задачи о взаимодействии сваи большой длины с окружающим многослойным и подстилающим грунтами с учетом реологических свойств окружающего массива грунта. Процесс ползучести изучался с учетом упрочнения.

**Материалы и методы.** Задача исследовалась в линейной постановке. Решение изложено аналитическим методом. Для описания процесса ползучести использовался реологический параметр упрочнения.

**Результаты.** Показаны выражение для нахождения приведенного модуля сдвига для многослойного массива грунта, зависимость для определения усилия на пяту сваи от времени с учетом реологического параметра упрочнения. Аналитические решения подкреплены графической частью. Приведены графики зависимости осадки сваи, усилия на пяту сваи, прорезающей чередующиеся слои, от времени при различных параметрах вязкости, при переменном параметре упрочнения.

**Выводы.** Полученные решения могут быть использованы для предварительного определения перемещения сваи большой длины с окружающим многослойным и подстилающим грунтами. Скорость изменения напряжения под подошвой сваи зависит от вязкости грунта. Реологический коэффициент упрочнения существенно влияет на время стабилизации давления под пятой сваи, а также на время стабилизации осадки сваи. Зависимости, продемонстрированные в данном исследовании, позволяют спрогнозировать развитие осадки во времени.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** взаимодействие сваи, многослойный и подстилающий грунты, упругая модель, аналитический метод, приведенный модуль, модуль сдвига, реологические свойства, скорость осадки

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Тер-Мартirosян З.Г., Акулецкий А.С. Взаимодействие сваи большой длины с многослойным массивом грунта с учетом упругих и реологических свойств и упрочнения // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 5. Стр. 608–614. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.608-614

## Interaction between a long pile and the multilayered soil body with account for elastic and rheological properties as well as soil stabilization

Zaven G. Ter-Martirosyan, Aleksandr S. Akuleckij

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

### ABSTRACT

**Introduction.** When the footing is embedded in loose clayey soils, buildings may settle down for a long period of time. The projected settlement period is of great importance for the design of foundations designated for such soils. Therefore, the approach to describing the process of foundation settlement must be considered as rheological. This article addresses the setting of and a solution to the problem of interaction between a long pile and surrounding multilayered and underlying soils with account taken of the rheological properties of the surrounding soil body. The creep process is considered with account taken of stabilization.

**Materials and methods.** Linear problem setting is considered. The analytical method is employed to present a solution. The rheological stabilization parameter is used to describe the creep process.

**Results.** An expression is derived to determine the reduced shear modulus for the multilayered soil body. The relationship between the value of the force applied to the pile toe and the time is derived with regard for the rheological stabilization parameter. Analytical solutions are enforced by graphs in the article. Graphs describing the relationship between pile settlement, the force applied to the toe of the pile, passing through alternating soil layers, and the time are provided for various values of viscosity and the variable parameter of stabilization.

**Conclusion.** Solutions, obtained by the co-authors, are used to perform the preliminary identification of displacement of long piles and surrounding multilayered underlying soils. The rate of stress changing underneath the pile toe depends on

soil viscosity. The rheological coefficient of stabilization has a major effect on the time of pressure stabilization underneath the pile toe, as well as the time of the pile settlement stabilization. Dependencies, derived in this article, make it possible to project the future settlement pattern.

**KEYWORDS:** pile interaction, multilayered and underlying soils, elastic model, analytical method, reduced modulus, shear modulus, rheological properties, settlement rate

**FOR CITATION:** Ter-Martirosyan Z.G., Akulekij A.S. Interaction between a long pile and the multilayered soil body with account for elastic and rheological properties as well as soil stabilization. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(5):608-614. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.608-614 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Площадки строительства характеризуются преимущественно сложными инженерно-геологическими условиями, представленными наличием в основании нескольких слоев, в том числе слабых глинистых водонасыщенных грунтов. В данных условиях применяется, как правило: закрепление грунтов [1–5], их армирование [6, 7], значительное заглубление подземной части зданий и т.д. Но в качестве основного типа фундамента на таких площадках рассматривают свайный фундамент [8–13]. При залегании в основании слабых глинистых грунтов осадка здания может продолжаться в течение значительного периода времени. Есть случаи, когда осадки зданий и сооружений не затухали в течение нескольких десятилетий. Самый известный пример — Пизанская башня, наклон которой развивался в течение нескольких столетий. Важное значение при проектировании фундаментов на таких грунтах имеет прогноз осадок во времени. Прочность и устойчивость сооружений будет зависеть как от скорости развития осадок во времени, так и от конечной осадки сооружения. Поэтому подход к описанию процесса осадок фундаментов необходимо изучать как реологический [14–21]. Очевидно, что при взаимодействии сваи большой длины с окружающим многослойным и подстилающим грунтами возникает сложное неоднородное напряженно-деформированное состояние (НДС). Ранее была проанализирована задача о взаимодействии сваи с многослойным грунтовым массивом в линейной и нелинейной постановке [22]. В настоящей работе рассматривается вопрос о взаимодействии длинной сваи с многослойным массивом грунта в линейной постановке, который обладает реологическими свойствами.

Исследования функционирования длинной сваи показывают, что ее влияние на окружающий массив грунта распространяется на расстояние не более 6–7 диаметров сваи, и такой же порядок в глубину под нижним ее концом [23]. Расстояние между сваями меньше шести диаметров обеспечивает смещение сваи и грунта в межсвайном пространстве одновременно. Данные исследования позволяют изучить смещение свайного фундамента и грунта как единого массива, а также задачу о взаимодействии длинной сваи с массивом грунта, как задачу о взаимодействии сваи с массивом грунта ограниченных размеров в виде цилиндра диаметром  $2b$  и высотой  $L > l$ , где  $l$  — длина сваи (рис. 1).

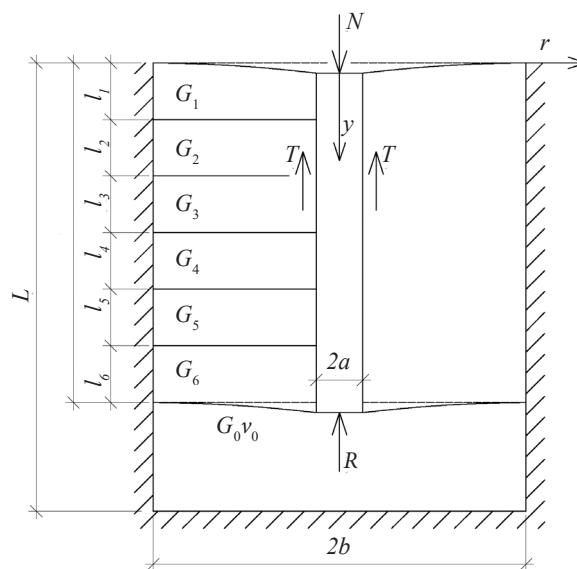


Рис. 1. Расчетная схема взаимодействия сваи с многослойным грунтовым цилиндром

Fig. 1. Design model of interaction between the pile and the multilayered soil column

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализ НДС грунтов вокруг сваи и под ее концом продемонстрировал, что при взаимодействии сваи с грунтом преобладают сдвиговые деформации, объемные деформации можно не учитывать [24]. Решение задачи будем рассматривать для сваи круглого сечения. Также принимаем, что жесткость сваи значительно превышает жесткость грунта  $E_{св} \gg E_{гр}$ .

Запишем уравнение равновесия для исследуемого случая (рис. 1):

$$N = T + R, \quad (1)$$

где

$$N = \pi a^2 p_1; \quad (2)$$

$$T = 2\pi a l \tau; \quad (3)$$

$$R = \pi a^2 p_2. \quad (4)$$

Подставляя уравнение (1) в уравнения (2)–(4), получаем выражения для  $\tau$ :

$$\tau = (p_1 - p_2) \frac{a}{2l}. \quad (5)$$

Так как  $E_{cb} \gg E_{rp}$ , осадка сваи каждого рассматриваемого слоя равна, т.е.

$$S_1 = S_2 = S_i = S, \quad (6)$$

где  $S_i$  — осадка сваи  $i$ -го слоя;  $S$  — общая осадка сваи.

Сдвиговую деформацию элементарного слоя грунта вокруг сваи можно определить по следующей зависимости:

$$\gamma_i(r) = -\frac{\tau_i(r)}{G_i}, \quad (7)$$

где  $G_i$  — модуль сдвига  $i$ -го слоя;  $i = 1, 2, \dots, n$  — номер слоя.

Исходя из условия (6) можем записать выражения для касательных напряжений  $i$ -го слоя:

$$\tau_i = \frac{\tau}{G} G_i, \quad (8)$$

где  $G$  — приведенный модуль сдвига многослойного массива грунта.

В соответствии с условием распределения касательных напряжений по длине сваи получаем:

$$\tau l = \tau_1 l_1 + \tau_2 l_2 + \tau_i l_i, \quad (9)$$

Рассматривая совместно формулы (9) и (8), выводим выражение для определения приведенного модуля сдвига для многослойного массива грунта:

$$G = \frac{l_1 G_1 + l_2 G_2 + l_i G_i}{l}, \quad (10)$$

где  $l$  — длина сваи;  $i = 1, 2, \dots, n$  — номер слоя.

Запишем зависимость для скорости изменения сдвиговой деформации вокруг сваи с учетом реологических свойств окружающего массива грунта:

$$\dot{\gamma} = -\frac{\dot{\tau}_\alpha}{G} + \frac{\tau_\alpha}{\eta(t)}, \quad (11)$$

где  $\dot{\tau}_\alpha$  — скорость изменения касательных напряжений,  $\tau_\alpha = T/2\pi a l$ ;  $\eta(t)$  — средневзвешенный коэффициент вязкости.

Поскольку усилия, передаваемые на сваю, постоянны ( $p_1 = \text{const}$ ), скорость изменения давления на оголовок сваи не меняется ( $\dot{p}_1 = 0$ ). Исходя из этого определяем скорость изменения касательных напряжений:

$$\dot{\tau}_\alpha = -\dot{p}_2 \frac{a}{2l}. \quad (12)$$

Скорость осадки сваи от действия касательных напряжений на боковой поверхности с учетом упруго-вязких характеристик окружающего массива грунта:

$$\dot{V}_T = \frac{a\tau_\alpha}{\eta(t)} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{a\dot{\tau}_\alpha}{G} \ln\left(\frac{b}{a}\right), \quad (13)$$

где  $G$  находим по формуле (10).

Определим скорость осадки сваи за счет деформации грунтов под нижним концом сваи, полагая, что свая действует как плоский круглый штамп. Уравнение имеет вид:

$$\dot{V}_R = \dot{p}_2 \frac{\pi a(1-\nu_0)K}{4G_0}, \quad (14)$$

где  $\dot{p}_2$  — скорость изменения давления под пятой сваи;  $\nu_0$  и  $G_0$  — деформационные параметры грунта под нижним концом сваи;  $K \leq 1$  — коэффициент, учитывающий глубину приложения нагрузки на пяту сваи.

Исходя из того, что  $E_{cb} \gg E_{rp}$ , скорость осадки от сил на боковой поверхности равна скорости осадки от действия сил на уровне нижнего конца сваи. Приравняв выражения (13) и (14), а также учитывая (5) и (12), получаем:

$$(p_1 - p_2) \frac{a^2}{2l\eta(t)} \ln\left(\frac{b}{a}\right) - \dot{p}_2 \frac{a^2}{2lG} \ln\left(\frac{b}{a}\right) = \dot{p}_2 \frac{\pi a(1-\nu_0)K}{4G_0}. \quad (15)$$

Выполнив определенные преобразования, получаем следующее дифференциальное уравнение:

$$\dot{p}_2 + p_2 \frac{1}{\eta(t)A} = \frac{p_1}{\eta(t)A}, \quad (16)$$

где

$$A = \frac{\pi(1-\nu_0)Kl}{2G_0 a \ln\left(\frac{b}{a}\right)} + \frac{1}{G}. \quad (17)$$

Общее решение дифференциального уравнения (16) находится по формуле [25]:

$$p_2(t) = e^{-\int \frac{dt}{\eta(t)A}} \left( \int \frac{p_1}{\eta(t)A} e^{\int \frac{dt}{\eta(t)A}} dt + C \right). \quad (18)$$

Для описания процесса ползучести используем реологический параметр упрочнения. Рассмотрим решение уравнения (18), когда  $\eta(t) = \eta_0 e^{\alpha t}$ . В таком случае:

$$p_2(t) = e^{-\int \frac{dt}{\eta_0 e^{\alpha t} A}} \left( \int \frac{p_1}{\eta_0 e^{\alpha t} A} e^{\int \frac{dt}{\eta_0 e^{\alpha t} A}} dt + C \right), \quad (19)$$

где  $\eta_0$  — начальный коэффициент вязкости грунта;  $\alpha$  — коэффициент упрочнения грунта.

$$p_2(t) = e^{\frac{-\alpha t}{\alpha \eta_0 A}} \left( \int \frac{p_1}{\eta_0 e^{\alpha t} A} e^{\frac{-\alpha t}{\alpha \eta_0 A}} dt + C \right) = e^{\frac{-\alpha t}{\alpha \eta_0 A}} \left( p_1 e^{\frac{-\alpha t}{\alpha \eta_0 A}} + C \right) = p_1 + C e^{\frac{-\alpha t}{\alpha \eta_0 A}}. \quad (20)$$

Постоянную интегрирования  $C$  определяем из начального условия при  $t = 0$ . Тогда:

$$C = (p_2(0) - p_1) / e^{\frac{1}{A\alpha\eta_0}}. \quad (21)$$

Окончательно получаем:

$$p_2(t) = p_1 + (p_2(0) - p_1) e^{\frac{e^{-at} - 1}{A\eta_0}}. \quad (22)$$

Осадку сваи в определенный момент времени  $t$  можно установить по формуле:

$$V_R(t) = p_2(t) \frac{\pi a(1 - \nu_0)K}{4G_0}, \quad (23)$$

где  $p_2(t)$  находим по формуле (22).

Рассмотрим решение уравнений (22) и (23) с начальным условием  $p_2(0) = 0$  при переменных значе-

ниях  $\eta_1 = 1 \cdot 10^{12}$  П,  $\eta_2 = 5 \cdot 10^{12}$  П,  $\eta_3 = 1 \cdot 10^{13}$  П,  $\eta_4 = 5 \cdot 10^{13}$  П, а также  $\alpha = 0,05$ ;  $l = 30$  м;  $a = 0,5$  м;  $b = 6,5 \cdot a$ ;  $E_1 = 30$  МПа,  $E_2 = 10$  МПа,  $E_3 = 25$  МПа,  $E_0 = 50$  МПа;  $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = \nu_0 = 0,35$ ;  $K = 0,7$ . Решения представлены на рис. 2, 3.

А также решение уравнений (22) и (23) при переменных значениях  $\alpha_1 = 0,10$ ,  $\alpha_2 = 0,15$ ,  $\alpha_3 = 0,20$ ,  $\alpha_4 = 0,25$ , а также  $\eta_1 = 1 \cdot 10^{12}$  П;  $l = 30$  м;  $a = 0,5$  м;  $b = 6,5 \cdot a$ ;  $E_1 = 30$  МПа;  $E_2 = 10$  МПа;  $E_3 = 25$  МПа;  $E_0 = 50$  МПа;  $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = \nu_0 = 0,35$ .

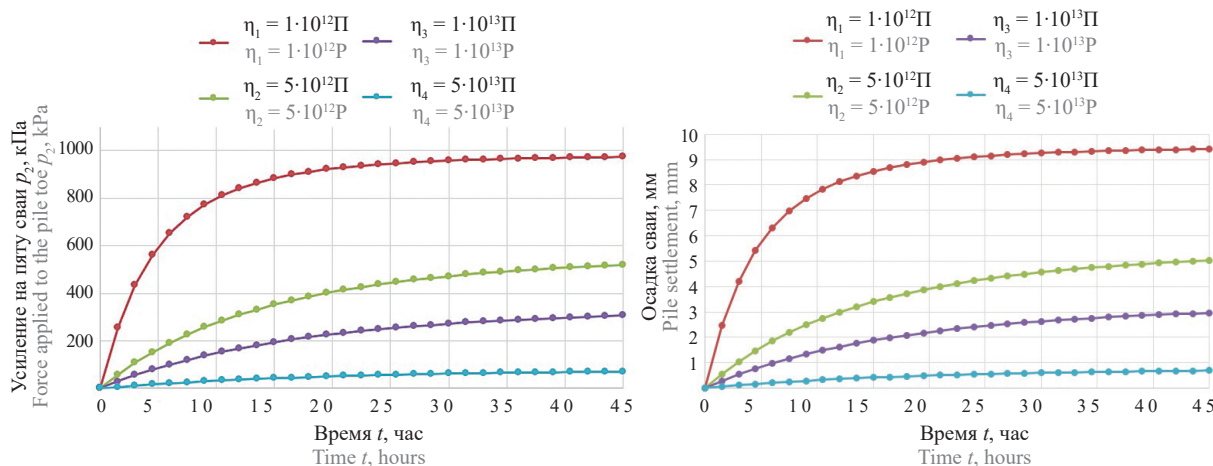


Рис. 2. Графики зависимости  $p_2(t)$  (слева) и  $V_R(t)$  (справа) при различных параметрах вязкости окружающего грунта

Fig. 2.  $p_2(t)$  (left) and  $V_R(t)$  (right) dependency graphs made for different viscosity parameters of surrounding soils

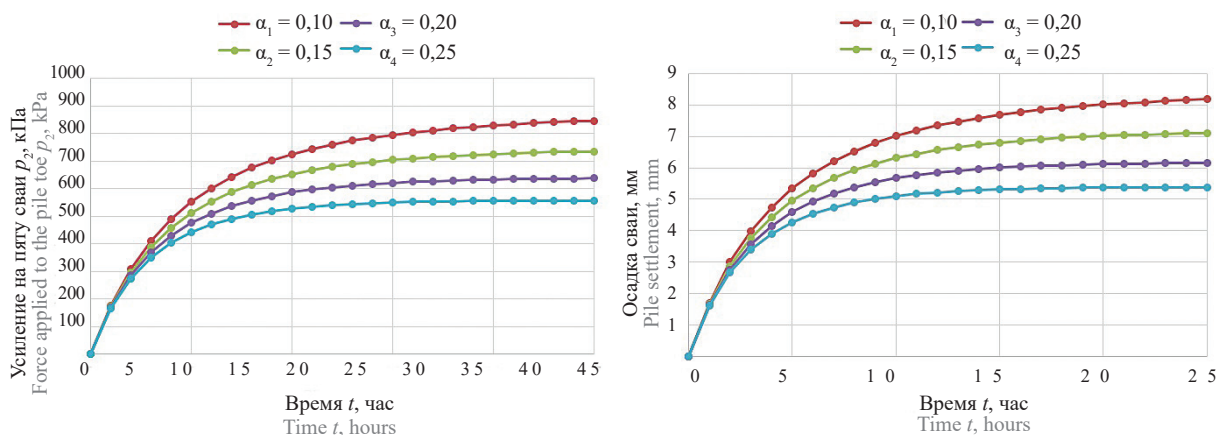


Рис. 3. Графики зависимости  $p_2(t)$  (слева) и  $V_R(t)$  (справа) при различных значениях коэффициента упрочнения

Fig. 3.  $p_2(t)$  (left) and  $V_R(t)$  (right) dependency graphs made for different values of the stabilization coefficient

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ полученных зависимостей показывает, что со временем напряжение под подошвой сваи и осадка сваи изменяются с различной скоростью и стремятся к постоянному значению (при  $t \rightarrow \infty$ ,  $p_2(t) \rightarrow p_{2\infty} = \text{const}$ ,  $V_R(t) \rightarrow V_{R\infty} = \text{const}$ ). Следовательно, исходя из условия (5), касательные напряжения на боковой поверхности сваи со временем

уменьшаются. Полученные зависимости позволяют спрогнозировать развитие осадки во времени. В соответствии с полученными данными, при увеличении коэффициента вязкости наблюдаются уменьшение скорости изменения напряжения под подошвой сваи, а также осадка сваи. Согласно полученным зависимостям (рис. 2, 3), при увеличении коэффициента упрочнения окончательное давление под подошвой сваи и осадка сваи уменьшаются.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При взаимодействии сваи с окружающим многослойным грунтовым массивом, который обладает упруго-вязкими характеристиками, возникает сложное НДС, при этом происходит изменение напряжения под подошвой сваи  $p_2$  во времени. Согласно полученным зависимостям, со временем наблюдается увеличение напряжений на пяте сваи, при этом касательные напряжения уменьшаются. Эти зависимости

дают возможность спрогнозировать развитие осадки сваи во времени. Реологические свойства многослойного грунтового массива оказывают существенное влияние на характер перераспределения усилий на сваю между боковой поверхностью и нижним концом. Анализ полученных графиков показывает, что время стабилизации осадок, а также время стабилизации давления под пятой сваи существенно зависят от реологического коэффициента упрочнения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Абелев М.Ю., Абелев К.М.* Геотехнические исследования площадок строительства, сложенных слабыми водонасыщенными глинистыми грунтами // *Геотехника*. 2010. № 6. С. 30–33.
2. *Ибрагимов М.Н., Семкин В.В.* Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов : монография. М. : Изд-во АСВ, 2012. 256 с.
3. *Бройд И.И.* Струйная геотехнология : учебное пособие для студентов. М. : Изд-во АСВ, 2004. 440 с.
4. *Малинин А.Г.* Струйная цементация грунтов. М. : Стройиздат, 2010. 226 с.
5. *Garassimo A.* Design procedures for jet-grouting // *Seminar on jet grouting*. Singapore, 1997.
6. *Караулов А.М.* Практический метод расчета вертикально армированного основания ленточных и отдельно стоящих фундаментов транспортных сооружений // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2012. № 2 (35). С. 183–190.
7. *Нуждин М.Л.* Экспериментальные исследования усиления грунтового основания свайных фундаментов армированием жесткими включениями // *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. 2019. Т. 10. № 3. С. 5–15. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.01
8. *Тер-Мартirosян А.З., Ле Дык Ань, Манукян А.В.* Влияние разжижения грунтов на расчетную несущую способность сваи // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 5. С. 655–664. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.655-664
9. *Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С.* Прогноз осадок свайных фундаментов. М. : Стройиздат, 1994. 380 с.
10. *Guo W.D.* Theory and practice of pile foundations. London : CRC Press, 2012. 576 p. DOI: 10.1201/b12980
11. *Prakash S., Sharma H.D.* Pile foundations in engineering practice. John Wiley and Sons, Inc, 1990. 768 p.
12. *Viggiani C., Mandolini A., Russo G.* Piles and pile foundations. London : CRC Press, 2012. 296 p. DOI: 10.4324/9780203880876
13. *Madabhushi G., Knappett J., Haigh S.* Design of Pile Foundations in Liquefiable Soils. London : CRC Press, 2009. 232 p. DOI: 10.1142/p628
14. *Арутюнян Н.Х.* Некоторые вопросы теории ползучести. М. ; Л. : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1952. 324 с.
15. *Вялов С.С.* Реологические основы механики грунтов. М. : Высшая школа, 1978. 447 с.
16. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. М. : Наука, 1966. 752 с.
17. *Галин Л.А.* Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. М. : Наука, 1986. 296 с.
18. *Месчан С.Р.* Экспериментальные основы реологии глинистых грунтов. Ереван : Гитутюн, 2008. 807 с.
19. *Зарецкий Ю.К.* Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. М. : Стройиздат, 1988. 349 с.
20. *Работнов Ю.Н.* Кратковременная ползучесть. М. : Наука, 1970. 224 с.
21. *Ржаницын А.Р.* Теория ползучести. М. : Стройиздат, 1968. 416 с.
22. *Тер-Мартirosян З.Г., Акулецкий А.С.* Взаимодействие сваи большой длины с окружающим многослойным и подстилающим грунтами // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 2. С. 168–175. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.168-175
23. *Тер-Мартirosян З.Г., Нгуен Занг Нам.* Взаимодействие сваи большой длины с неоднородным массивом с учетом нелинейных и реологических свойств грунтов // *Вестник МГСУ*. 2008. № 2. С. 3–14.
24. *Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З.* Механика грунтов. М. : Изд-во АСВ, 2020. 551 с.
25. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике. М. : Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 2008. 608 с.

Поступила в редакцию 9 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 11 мая 2021 г.

Одобрена для публикации 11 мая 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Завен Григорьевич Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9613-8764, ORCID: 0000-0001-9159-6759, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; ter-martyrosyanzg@mgsu.ru;

**Александр Сергеевич Акулецкий** — аспирант кафедры механики грунтов и геотехники, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 981728, ORCID: 0000-0001-5752-1120; akula.92@inbox.ru.

## REFERENCES

1. Abelev M.Yu., Abelev K.M. Geotechnical studies of construction sites on soft water-saturated clay soils. *Geotechnics*. 2010; 6:30-33. (rus.).
2. Ibragimov M.N., Semkin V.V. *Consolidation of soils by injection of cement mortars: monograph*. Moscow, ASV Publ., 2012; 256 (rus.).
3. Broyd I.I. *Jet Geotechnology: a study guide for students*. Moscow, ASV Publ., 2004; 440. (rus.).
4. Malinin A.G. *Jet grouting of soils*. Moscow, Stroyizdat, 2010; 165. (rus.).
5. Garassimo A. Design Procedures for Jet-Grouting. *Seminar on jet grouting*. Singapore, 1997.
6. Karaulov A.M. Practical method for calculation of vertical reinforced beds of strip foundations of isolated transport facilities. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2012; 2(35):183-190. (rus.).
7. Nuzhdin M.I. Experimental studies of pile foundation ground base reinforced with hard inclusions. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2019; 10(3):5-15. DOI: 10.15593/2224-9826/2019.3.01 (rus.).
8. Ter-Martirosyan A.Z., Le Duc Anh, Manukyan A.V. Influence of soil liquefaction on the design bearing capacity of a single pile. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(5):655-664. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.655-664 (rus.).
9. Bartolomey A.A., Omel'chack I.M., Yushkov B.S. *Pile foundation settlement forecast*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1994; 380. (rus.).
10. Guo W.D. *Theory and Practice of Pile Foundations*. London, CRC Press, 2012; 576. DOI: 10/1201/b12980
11. Prakash S., Sharma H.D. *Pile foundations in engineering practice*. John Wiley and Sons, Inc, 1990; 768.
12. Viggiani C., Mandolini A., Russo G. *Piles and Pile Foundations*. London, CRC Press, 2012; 296. DOI: 10/4324/9780203880876
13. Madabhushi G., Knappett J., Haigh S. *Design of Pile Foundations in Liquefiable Soils*. London, CRC Press, 2009; 232. DOI: 10.1142/p628
14. Arutyunyan N.H. *Some questions of the theory of creep*. Moscow, Leningrad, State publishing house of technical and theoretical literature, 1952; 324. (rus.).
15. Vyalov S.S. *Rheological foundations of soil mechanics*. Moscow, High school Publ., 1978; 447. (rus.).
16. Rabotnov Yu.N. *Creep of structural elements*. Moscow, Science Publ., 1966; 752. (rus.).
17. Galin L.A. *Contact problems of the theory of elasticity and viscoelasticity*. Moscow, Science Publ., 1986; 296. (rus.).
18. Meschyan S.R. *Experimental foundations of the rheology of clay soils*. Yerevan, Gitutiun Publ., 2008; 788. (rus.).
19. Zaretsky Yu.K. *Viscoplasticity of soils and calculations of structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978; 344. (rus.).
20. Rabotnov Yu.N. *Short-term creep*. Moscow, Science, 1979; 222. (rus.).
21. Rzhantsiyn A.R. *Creep theory*. Moscow, Stroyizdat, 1968; 419. (rus.).
22. Ter-Martirosyan Z.G., Akuletskii A.S. Interaction between a long pile and multi-layer underlying soils. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(2):168-175. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.168-175 (rus.).
23. Ter-Martirosyan Z.G., Nguyen Giang Nam. Interaction between long piles and a heterogeneous massif with account for non-linear and rheological properties of soils. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2008; 2:3-14. (rus.).
24. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z. *Soil Mechanics*. Moscow, ASV Publishing House, 2020; 551. (rus.).
25. Bronstein I. N., Semendyaev K.A. *Mathematics reference*. Moscow, Leningrad, State publishing house of technical and theoretical literature, 2009; 608. (rus.).

Received March 9, 2021.

Adopted in revised form on May 11, 2021.

Approved for publication on May 11, 2021.

**BIONOTES:** **Zaven G. Ter-Martirosyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9613-8764, ORCID: 0000-0001-9159-6759, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; ter-martyrosyanzg@mgsu.ru;

**Aleksandr S. Akuleckij** — postgraduate student of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 981728, ORCID: 0000-0001-5752-1120; akula.92@inbox.ru.

## Dynamic simulation of a high altitude gantry crane with cable hoisting. Part one. 2D model

**Mostafa Jafari, Evgeniy M. Kudryavtsev**

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

### ABSTRACT

**Introduction.** Simulation of the 2D dynamic motion of a high altitude wide span gantry crane with a rope hoisting mechanism is addressed. Such large gantry cranes with a height of more than 50 meters, have been unstudied very well so far. A small swing angle of the payload, its fast hoisting, and the fast motion of the trolley are critical for these cranes and, hence, they need to be analyzed in detail.

**Materials and methods.** The generalized formulation of the two-dimensional crane dynamics is efficiently performed and simulated in Mathcad. This is a single mass model that has a non-elastic cable. The formulation is derived using the Lagrange method, and differential equations are correctly solved using the Runge-Kutta method in Mathcad. In this model the crane is fixed, and all the subsystems are considered as rigid bodies without any deflection in terms of the trolley and the payload.

**Results.** The results are verified using MSC ADAMS (Academic) that indicates satisfactory convergence. The considerable influence of the payload oscillation on the trolley motion is visible in both Mathcad and ADAMS models. The implemented Mathcad code can be useful for students and researchers.

**Conclusions.** The maximum speed of the trolley is 1.716 m/s to prevent the payload swinging angle from exceeding 0.5 deg. The calculated velocity of the trolley is reasonable for such a large crane if limitations like wind effects and resonance are ignored.

**KEYWORDS:** gantry crane, hoisting mechanism, trolley, Mathcad, MSC ADAMS, Lagrange method, oscillation

**FOR CITATION:** Jafari M., Kudryavtsev E.M. Dynamic simulation of a high altitude gantry crane with cable hoisting. Part one. 2D model. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(5):615-622. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.615-622 (rus.).

## Динамическое моделирование высокого козлового крана с канатным подъемником. Часть 1. 2D-модель

**Мостафа Джафари, Е.М. Кудрявцев**

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассмотрено моделирование динамического движения высокого и широкого козлового крана с канатным подъемным механизмом. Такие большие козловые краны высотой более 50 м недостаточно хорошо изучены. Уменьшение угла поворота полезной нагрузки при быстром подъеме и быстром движении тележки является критическим для этих кранов и нуждается в дополнительном анализе.

**Материалы и методы.** Обобщенная формулировка двумерной динамики крана эффективно выполняется и моделируется в Mathcad. Модель изучалась как монокристаллическая масса с неупругим кабелем. Формулировка получена путем реализации метода Лагранжа, а дифференциальные уравнения корректно решаются с помощью решателя Рунге-Кутты в системе Mathcad. В этой модели кран останавливается, и все подсистемы рассматриваются как твердые тела без какого-либо прогиба, как единая точка массы для тележки и полезной нагрузки.

**Результаты.** Результаты верифицируются с помощью MSC ADAMS (Academic), что указывает на удовлетворительный итог. Значительное влияние колебаний полезной нагрузки на движение тележки видно как в моделях Mathcad, так и в моделях ADAMS. Реализованный код Mathcad может быть полезен студентам и исследователям.

**Выводы.** Максимальная скорость тележки составляет 1,716 м/с, чтобы избежать колебаний полезной нагрузки более чем на 0,5 град. Рассчитанная скорость тележки является разумной для такого большого крана, игнорируя при этом такие ограничения, как влияние ветра и резонанс.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** козловой кран, механизм подъема, тележка, Mathcad, MSC ADAMS, метод Лагранжа, колебания

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Джафари М., Кудрявцев Е.М. Dynamic simulation of a high altitude gantry crane with cable hoisting. Part one. 2D model // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. Вып. 5. С. 615–622. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.615-622

INTRODUCTION

The value of the global crane market reached USD 31.15 billion in 2018 and is expected to increase by about 4.26 % during the forecast period (2019–2024)<sup>1</sup>. Cranes are increasingly used in transportation and construction industries. They are also becoming larger, faster, and higher, thus, necessitating efficient controllers to guarantee little turnover time with account taken of the safety requirements. Over the last 60 years, we have evidenced a growing interest in research on the modeling and control of cranes<sup>2</sup> of all types, including tower, overhead, gantry cranes, etc.

Gantry cranes are very popular construction site machines and research items. Methods of control of this type of mobile cranes are very interesting for scientists (over 105 papers from 2007 till 2020 indexed in Scopus), their dynamic models are also extensively covered in literature [1–3]. Other topics in this area include optimization methods [4, 5], structural design [6], analysis of failures [7, 8], emergency behavior [9], vibration reduction and stability [10–13], robotics and automatization [14, 15], energy saving [16], virtual reality [17], market analysis<sup>3</sup>, crane scheduling and assignment problems [18, 19], etc.

Large gantry cranes are more widely used, and many companies use them every year. However, despite much research on cranes, such super cranes have not been sufficiently studied [20, 21], although many of their problems [21–23] require new solutions and advanced technologies.

In this paper, a three-degrees-of-freedom dynamic analysis of a high altitude wide span gantry crane is performed with regard for the effect of a single rope hoisting mechanism on the payload swing angle. A generalized formulation of the two-dimensional crane behaviour is simulated in Mathcad [24] and verified using MSC ADAMS [25] (Academic) that shows good convergence.

MATERIALS AND METHODS

System modeling

Fig. 1 shows a dynamical model. All the subsystems are considered as rigid bodies without any deflection, and the crane is fixed. The mechanism selected for the hoisting system has a single rope having a single

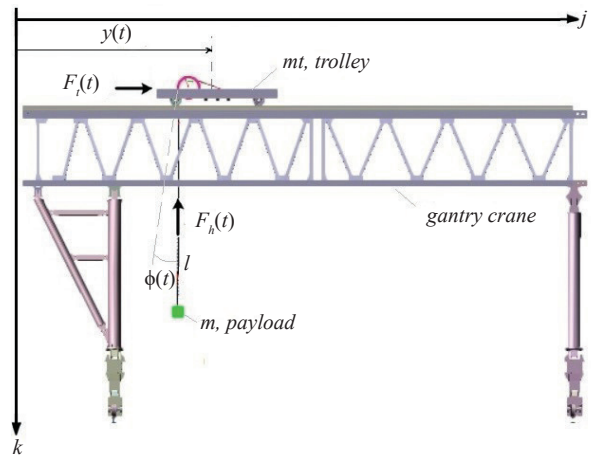


Fig. 1. Illustration of the 2D gantry crane having a single rope hoisting system

mass point for the hook and the payload. The 2D crane model has two masses that are the trolley and the payload,  $mt, m$ , respectively. The system has three degrees of freedom,  $y$ , and  $z$  for the position of the payload and the trolley and  $\phi(t)$  for the oscillation of the payload (sway angle) on the  $x-z$  axis.

According to Fig. 1, the trolley moves along the  $j$  axis with the help of  $F_t(t)$  as a controlling force. Besides, the payload goes up and down along the  $k$  axis and oscillates in the  $y-z$  plane using the hoisting system control force  $F_h(t)$ . The hoisting system takes advantage of the rope length changing mechanism, the acceleration of the trolley, and its velocity will be discussed in the next section (Fig. 1).

Since the lumped model is used in this paper, the rope is non-elastic. The Lagrange method is employed to identify kinetic and potential energies ( $T$  and  $V$ )<sup>4,5</sup>:

$$T = 0.5m_b \dot{y}(t)^2 + 0.5m(\dot{y}(t)^2 + \dot{l}(t)^2 + l(t)^2 \dot{\phi}(t)^2 + 2\dot{y}(t)\dot{l}(t)\sin\phi(t) + 2\dot{y}(t)\dot{l}(t)\dot{\phi}(t)\cos\phi(t)); \tag{1}$$

$$V = -mgl \cos\phi(t). \tag{2}$$

Here are the three-degrees-of-freedom equations of motion of the hoisting payload and the travelling trolley, given  $F_h(t)$  control forces and  $F_t(t)$ :

$$l(t)\ddot{\phi}(t) + 2\dot{l}(t)\dot{\phi}(t) + g \sin\phi(t) + \ddot{y}(t)\cos\phi(t) = 0; \tag{3}$$

$$(m_t + m)\ddot{y}(t) + ml(t)(\ddot{\phi}(t)\cos\phi(t) - \dot{\phi}(t)^2 \sin\phi(t)) + m\ddot{l}(t)\sin\phi(t) + 2m\dot{l}(t)\dot{\phi}(t)\cos\phi(t) = F_t; \tag{4}$$

$$m\ddot{l}(t) - ml(t)\dot{\phi}(t)^2 - mg \cos\phi(t) + m\ddot{y}(t)\sin\phi(t) = -F_h. \tag{5}$$

<sup>1</sup> Crane market — growth, trends, COVID-19 impact, and forecast (2021–2026). URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/crane-market>

<sup>2</sup> Abdel-Rahman E.M. Dynamics and control of cranes: A review // Journal of Vibration and Control. 2003. No. 7. Pp. 863–908.

<sup>3</sup> Global portable gantry crane market size 2021 — Industry analysis and forecast 2027 available at Absolute Reports. URL: <https://www.marketwatch.com/press-release/global-portable-gantry-crane-market-size-2021---industry-analysis-and-forecast-2027-available-at-absolute-reports-2021-04-05>

<sup>4</sup> Kim Yong-Seok, Hong Keum-Shik, Sul Seung-Ki. Anti-sway control of container cranes: Inclinometer, observer, and state Feedback // International Journal of Control, Automation and Systems. 2004. Vol. 2. No 4. Pp. 435–449.

<sup>5</sup> Lee H. Modeling and control of a three-dimensional overhead crane // Journal of Dynamic Systems Measurement and Control. 1998. Vol. 120. No. 4. Pp. 471–476. DOI: 10.1115/1.2801488

**Gantry Crane 2D model in Mathcad**

Modeling of the gantry crane dynamics in the Mathcad software [26] is shown in Fig. 2 and 5;

besides, the results are displayed in Fig. 6 to 10. Mathcad will find  $y''$  and  $\phi''$  using equations (3), (4) [27].

Modeling of the gantry crane dynamics in the Mathcad software:

Given

$$(mt + m) \cdot y'' + m \cdot L \cdot \phi'' \cdot \cos(\phi) - \phi'^2 \cdot \sin(\phi) + m \cdot L'' \cdot \sin(\phi) + 2 \cdot m \cdot L' \cdot \phi' \cdot \cos(\phi) = Ft$$

$$L \cdot \phi'' + 2 \cdot L' \cdot \phi' + g \cdot \sin(\phi) + y'' \cdot \cos(\phi) = 0$$

$$\text{Find}(y'', \phi'') \rightarrow \left( \begin{array}{c} \frac{\sin(\phi) \cdot \phi'^2 + Ft - L'' \cdot m \cdot \sin(\phi) + g \cdot m \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\phi)}{m - m \cdot \cos(\phi)^2 + mt} \\ \frac{Ft \cdot \cos(\phi) + 2 \cdot L' \cdot m \cdot \phi' + 2 \cdot L' \cdot mt \cdot \phi' + g \cdot m \cdot \sin(\phi) + g \cdot m \cdot \sin(\phi) + \phi'^2 \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\phi) - L'' \cdot m \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\phi) - 2 \cdot L' \cdot m \cdot \phi' \cdot \cos(\phi)^2}{L \cdot m - L \cdot m \cdot \cos(\phi)^2 + L \cdot mt} \end{array} \right)$$

Trolley acceleration prediction:

$$A1(t) := a \cdot t^2 + b \cdot t \quad A2(t) := c \cdot t^2 + d \cdot t + e$$

$$A(t) := \begin{cases} A1(t) & \text{if } 0 \leq t \leq t1 \\ A2(t) & \text{if } t1 < t \end{cases} \quad t1 := 30$$

Trolley acceleration prediction (Mathcad Subroutine):

$$(a \ b \ c \ d \ e \ h \ o) := \left( -\frac{67}{119475} \ \frac{14}{885} \ \frac{8}{597375} \ -\frac{56}{39825} \ 0 \ \frac{1372}{531} \ -\frac{6310}{177} \right)$$

Export to Adams:

$$A1\_comp(\text{time}) := a \cdot \text{time}^2 + b \cdot \text{time} \rightarrow \frac{21 \cdot \text{time}}{1475} - \frac{67 \cdot \text{time}^2}{119475}$$

$$A2(\text{time}) := c \cdot \text{time}^2 + d \cdot \text{time} + e \rightarrow \frac{4 \cdot \text{time}^2}{331875} - \frac{28 \cdot \text{time}}{22125}$$

$$Ft(t) := A(t) \cdot mt \quad y''(t) := \frac{Ft(t)}{mt}$$

Cable hoisting Profile (from ADAMS):

|          |   |        |       |        |     |
|----------|---|--------|-------|--------|-----|
| $Wh^T =$ |   | 102    | 103   | 104    | 105 |
|          | 0 | -0.924 | -0.42 | -0.108 | 0   |
|          | 1 | 102    | 103   | 104    | ... |

$$X := Wh^{(1)} \quad Y := L0 + Wh^{(0)} \quad S := \text{cspline}(X, Y)$$

$$L(t) := \text{interp}(S, X, Y, t) \quad L'(t) := \frac{d}{dt}L(t) \quad L''(t) := \frac{d}{dt}L'(t)$$

Fig. 2. Modeling gantry crane dynamics in the Mathcad software

According to Fig. 3, a suitable quadratic trolley control force of  $F_t(t)$  is projected for the crane span of 80 meters having a 30-sec payload hoisted up. Also, this control force is used in ADAMS to find a suitable cable hoisting rate by modeling the cable system (Fig. 4).

Differential equations are solved in Mathcad using the Runge-Kutta method with a variable step that modifies the integral step size based on the prediction of an integration error. The solution procedure is provided below (Fig. 5).

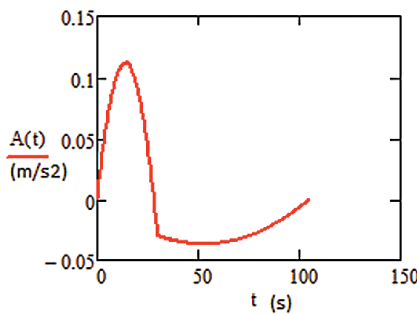


Fig. 3. Mathcad model: automatic derivation of  $y''$  and  $\phi''$

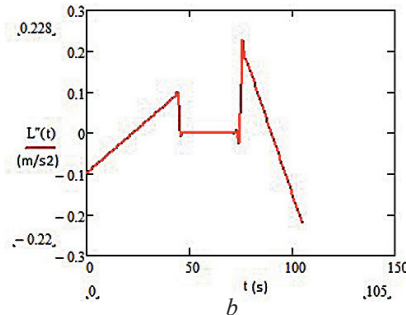
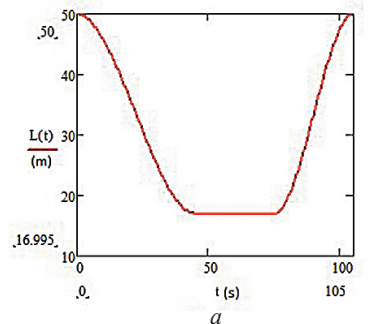


Fig. 4. Cable hoisting profile projection (using ADAMS software): a — cable length; b — cable hoisting acceleration

The solution of the differential equations of the payload motion with Mathcad:

|                             |                        |                                                  |                               |
|-----------------------------|------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|
| Trolley mass point:         | mt := 5.3574294668E+05 | Trolley Action Force                             | Ft(t)                         |
| Payload mass point:         | m := 5.436246312E+04   | Payload Action Force                             | Fh(t)                         |
| Length of the pendulum:     | L0 := 50               | Trolley displacement: (y, y')                    | x <sub>0</sub> x <sub>2</sub> |
| Final time for integration: | tend := 105            | Angel: (φ, φ')                                   | x <sub>1</sub> x <sub>3</sub> |
| Gravitational acceleration: | g := 9.81              | N1 := 200      t := 0, $\frac{tend}{N1}$ .. tend | tt := t                       |

x := (0 0 0 0)<sup>T</sup>

$$D(t, x) = \frac{\sin(x_1) \cdot (x_3)^2 + Ft(t) - L^*(t) \cdot m \cdot \sin(x_1) + g \cdot m \cdot \cos(x_1) \cdot \sin(x_1)}{m - m \cdot \cos(x_1)^2 + mt}$$

$$\frac{Ft(t) \cdot \cos(x_1) + 2 \cdot L'(t) \cdot m \cdot x_3 + 2 \cdot L'(t) \cdot mt \cdot x_3 + g \cdot m \cdot \sin(x_1) + g \cdot mt \cdot \sin(x_1) + (x_3)^2 \cdot \cos(x_1) \cdot \sin(x_1) - L^*(t) \cdot m \cdot \cos(x_1) \cdot \sin(x_1) - 2 \cdot L'(t) \cdot m \cdot x_3 \cdot \cos(x_1)^2}{L(t) \cdot m - L(t) \cdot m \cdot \cos(x_1)^2 + L(t) \cdot mt}$$

t0 := 0      t1 := tend      N := N1      Z := Rkadapt(x, t0, t1, N, D)

t := Z<0>      x0 := Z<1>      x1 := Z<2>      x2 := Z<3>      x3 := Z<4>

Fig. 5. The solution to the differential equations describing gantry crane dynamics in the Mathcad software

RESULTS OF THE RESEARCH

Fig. 6, 7 and 8 illustrate the results of the simulation. Fig. 7 shows the swing angle of the payload that remains below 0.5 deg because of the appropriate trolley and payload control forces. Fig. 4 shows trolley

displacement and velocity. The maximum speed of the trolley is 1.716 m/s to prevent the payload swinging angle from exceeding 0.5 deg. The trolley velocity is reasonable for this type of cranes, if such limitations as wind effects are ignored.

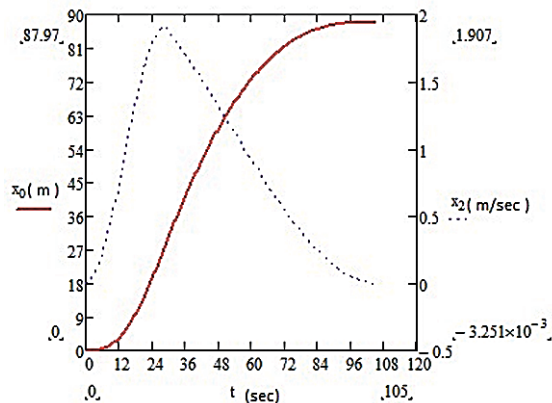


Fig. 6. x<sub>0</sub>: Trolley Displacement (y); x<sub>2</sub>: Trolley velocity (y') in Mathcad

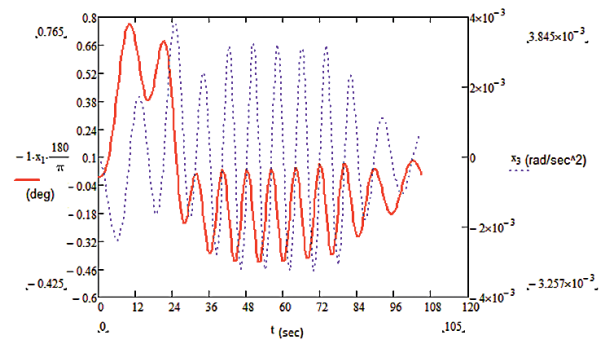


Fig. 7. x<sub>1</sub>: Swing angle ao of payload (φ); x<sub>3</sub>: Payload angular velocity (φ') in Mathcad

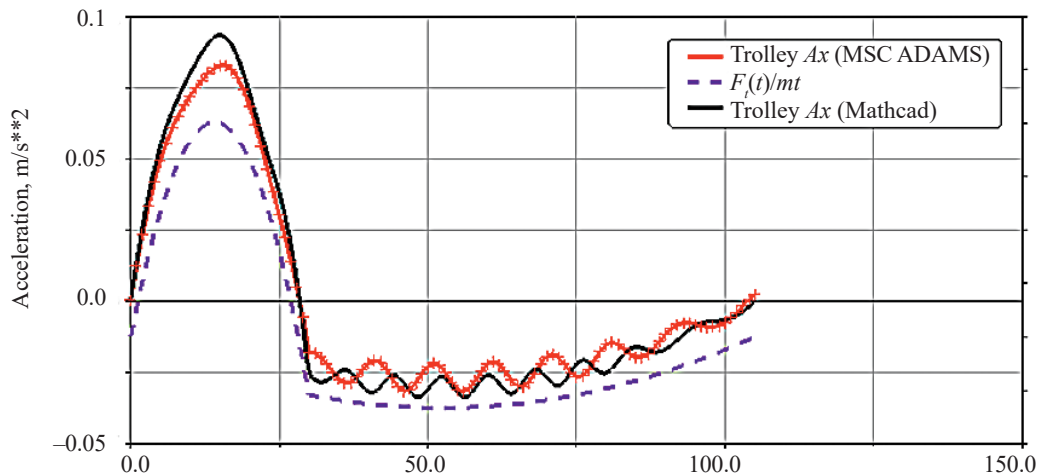


Fig. 8. Trolley acceleration in MSC ADAMS and Mathcad

The effect of payload oscillation on the trolley dynamics in Mathcad and MSC ADAMS models is shown in Fig. 8. The difference between input control force  $F_x(t)$  using both ADAMS and Mathcad models is visible. Fig. 9 compares payload and trolley velocities. Payload oscillation is clear in Fig. 7 to 9. Fig. 10 shows hoisting animation and the payload trajectory using MSC ADAMS.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

In this study, the dynamic analysis of a gantry crane having a single rope hoisting mechanism was performed. The dynamic model was considered as

a lumped mass having a non-elastic cable. All the sub-systems were considered as rigid bodies without any deflection. The formulation performed using the Lagrange method and the Mathcad solution were exhaustively described that can be useful for researchers.

The results were verified using MSC ADAMS, and they demonstrate excellent convergence. The effect of payload oscillation on the trolley movement was visible in both Mathcad and ADAMS models. The maximum velocity of the trolley is 1.716 m/sec to avoid the payload swing angle to exceed 0.5 deg. The trolley velocity is reasonable for this type of cranes, if such limitations as wind effects and resonance are ignored.

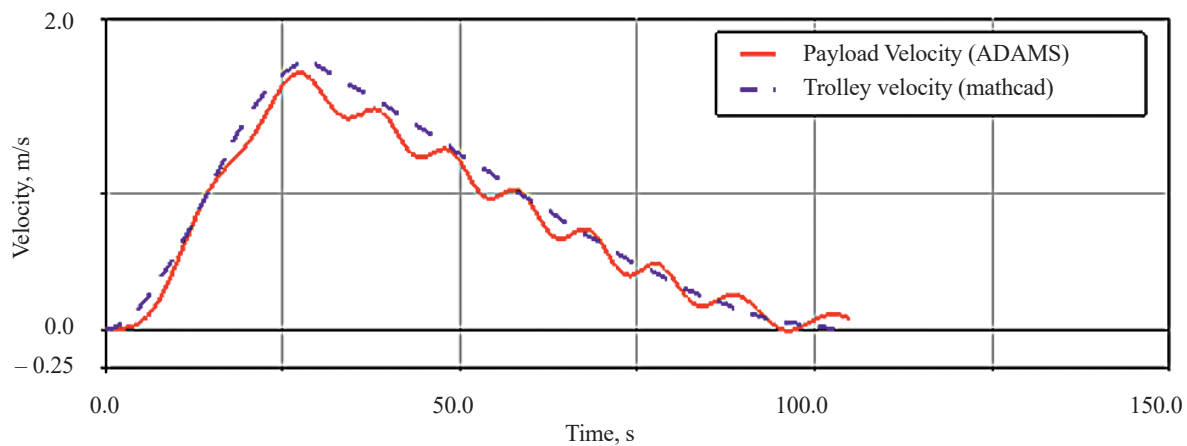


Fig. 9. Comparison of the Trolley and the Payload Velocity in MSC ADAMS and Mathcad

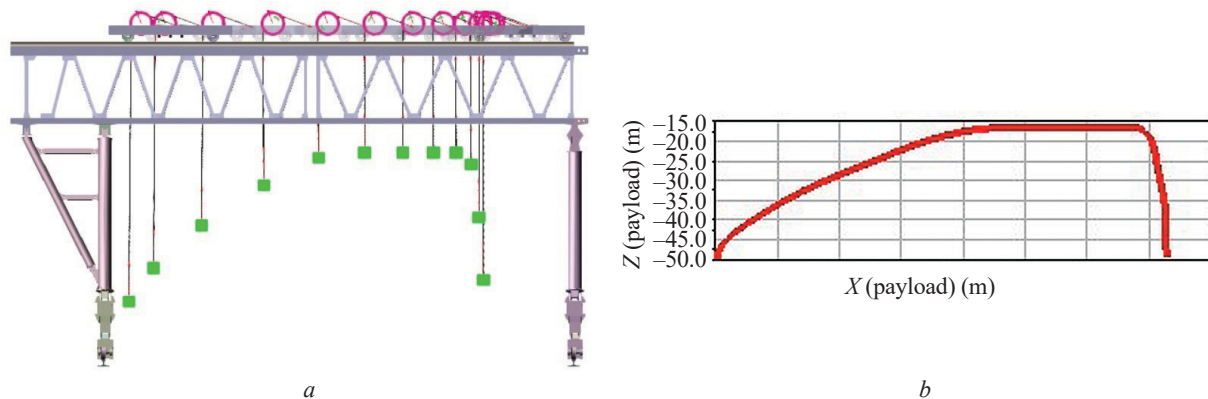


Fig. 10. Hoisting animation using MSC ADAMS (a); payload hoisting trajectory (b)

## REFERENCES

1. Shehu M.A., Li A. A novel smooth super-twisting control method for perturbed nonlinear double-pendulum-type overhead cranes. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2021. DOI: 10.1007/s13369-021-05340-0
2. Kudryavtsev E., Jafari M. Simulation of internal forces of a cantilevered beam with a moving load. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1103(1):012007. DOI: 10.1088/1757-899X/1103/1/012007
3. Kudryavtsev E.M., Gavrilenko A.V., Jafari M. Computer simulation of dynamic loads on a gantry crane load beam. *Quality and Life*. 2020; 4(28):23-28. DOI: 10.34214/2312-5209-2020-28-4-23-28 (rus.).
4. Qu X., Xu G., Fan X., Bi X. Intelligent optimization methods for the design of an overhead travelling crane. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2015; 28(1):187-196. DOI: 10.3901/cjme.2014.1008.157

5. Ku L.P., Lee L.H., Chew E.P., Tan K.C. An optimisation framework for yard planning in a container terminal: Case with automated rail-mounted gantry cranes. *OR Spectrum*. 2010; 32(3):519-541. DOI: 10.1007/s00291-010-0200-9
6. Fan X.N., Zhi B. Design for a crane metallic structure based on imperialist competitive algorithm and inverse reliability strategy. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2017; 30:900-912. DOI: 10.1007/s10033-017-0139-8
7. Domazet T., Lukša F., Bugarin M. Failure of two overhead crane shafts. *Engineering Failure Analysis*. 2014; 44:125-135. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.05.001
8. Alam M.R., Hassan S.F., Amin M.A., Arif-Uz-Zaman K., Karim M.A. Failure analysis of a mobile crane: a case study. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2018; 18(3):545-553. DOI: 10.1007/s11668-018-0437-1
9. Ma B., Fang Y., Zhang Y. Switching-based emergency braking control for an overhead crane system. *IET Control Theory & Applications*. 2010; 4(9):1739-1747. DOI: 10.1049/iet-cta.2009.0277
10. Shin J.H., Lee D.H., Kwak M.K. Vibration suppression of cart-pendulum system by combining the input-shaping control and the position-input position-output feedback control. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019; 33(12):5761-5768. DOI: 10.1007/s12206-019-1120-5
11. Ursavas E. Crane allocation with stability considerations. *Maritime Economics & Logistics*. 2017; 19(2):379-401. DOI: 10.1057/mel.2015.35
12. Sinel'shchikov A.V., Dzhalmukhambetov A.I. Development of methods for stability analysis of tower cranes. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(12):(111):1342-1351. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.12.1342-1351 (rus.).
13. Stürzer D., Arnold A., Kugi A. Closed-loop stability analysis of a gantry crane with heavy chain and payload. *International Journal of Control*. 2018; 91(8):1931-1943. DOI: 10.1080/00207179.2017.1335439
14. Scalera L., Gallina P., Seriani S., Gasparetto A. Cable-Based Robotic Crane (CBRC): Design and implementation of overhead traveling cranes based on variable radius drums. *IEEE Transactions on Robotics*. 2018; 34(2):474-485. DOI: 10.1109/TRO.2018.2791593
15. Adenso-Díaz B., Álvarez N.G., Alba J.A.L. A fuzzy AHP classification of container terminals. *Maritime Economics & Logistics*. 2020; 22(2):218-238. DOI: 10.1057/s41278-019-00144-4
16. Pietrosanti S., Harrison I., Luque A., Holderbaum W., Becerra V.M. Net energy savings in Rubber Tyred Gantry cranes equipped with an active front end. *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. 2016. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555814
17. Kayhani N., Taghaddos H., Noghabae M., Hermann U. Utilization of virtual reality visualizations on heavy mobile crane planning for modular construction. *Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2018. DOI: 10.22260/isarc2018/0170
18. Fazli M., Fathollahi-Fard A., Tian G. Addressing a coordinated quay crane scheduling and assignment problem by red deer algorithm. *International Journal of Engineering*. 2019; 32(8). DOI: 10.5829/ije.2019.32.08b.15
19. Nahavandi N., Behjat S. A mathematical model and grouping imperialist competitive algorithm for integrated quay crane and yard truck scheduling problem with non-crossing constraint. *International Journal of Engineering*. 2019; 32(10). DOI: 10.5829/ije.2019.32.10a.16
20. Peng Q., Cheng W., Jia H., Guo P. Fragility analysis of gantry crane subjected to near-field ground motions. *Applied Sciences*. 2020; 10(12):4219. DOI: 10.3390/app10124219
21. Frenzo F. Gantry crane derailment and collapse induced by wind load. *Engineering Failure Analysis*. 2016; 66:479-488. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.05.008
22. Solihin M.I., Lim W.H., Tiang S.S., Ang C.K. Modified particle swarm optimization for robust anti-swing gantry crane controller tuning. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2021; 1173-1192. DOI: 10.1007/978-981-15-5281-6\_83
23. Ha S., Ku N., Roh M.-I. Event-based scenario manager for multibody dynamics simulation of heavy load lifting operations in shipyards. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2016; 8(1):83-101. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2015.10.004
24. Jafari M., Kudryavtsev E.M. Gantry crane trolley dynamic analysis. *Lifting and transport, construction, road, track machines and robotic complexes: 24th Moscow International Interuniversity scientific and Technical conference of students, undergraduates, postgraduates and young scientists*. Moscow, 2020. (rus.).
25. Jafari M., Toloei A. Simulation of strap-on boosters separation in the atmosphere. *International Journal of Engineering*. 2015; 28(2):(B). DOI: 10.5829/idosi.ije.2015.28.02b.01
26. Kudryavtsev E., Gavrilenko A., Jafari M. Modeling of dynamic loadings on a tower crane jib. *MATEC Web of Conferences*. 2020; 329:03031. DOI: 10.1051/mateconf/202032903031
27. Kudryavtsev E.M., Stepanov M.A. *Construction cranes*. Moscow, Publishing house ASV, 2016; 329. (rus.).

Received January 9, 2021.

Adopted in revised form on May 17, 2021.

Approved for publication on May 17, 2021.

**BIONOTES: Mostafa Jafari** — Postgraduate student of the Department of Construction Mechanization; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; mostafa.jafari@mail.ru;

**Evgeniy M. Kudryavtsev** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction Mechanization; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 691899; sdm@mgsu.ru.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Shehu M.A., Li A.* A novel smooth super-twisting control method for perturbed nonlinear double-pendulum-type overhead cranes // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2021. DOI: 10.1007/s13369-021-05340-0
2. *Kudryavtsev E., Jafari M.* Simulation of internal forces of a cantilevered beam with a moving load // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1103. No. 1. P. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/1103/1/012007
3. *Кудрявцев Е.М., Гавриленко А.В., Джафари М.* Компьютерное моделирование динамических нагрузок на грузовую балку козлового крана // *Качество и жизнь*. 2020. № 4 (28). С. 23–28. DOI: 10.34214/2312-5209-2020-28-4-23-28
4. *Qu X., Xu G., Fan X., Bi X.* Intelligent optimization methods for the design of an overhead travelling crane // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 28. No. 1. Pp. 187–196. DOI: 10.3901/cjme.2014.1008.157
5. *Ku L.P., Lee L.H., Chew E.P., Tan K.C.* An optimisation framework for yard planning in a container terminal: Case with automated rail-mounted gantry cranes // *OR Spectrum*. 2010. Vol. 32. No. 3. Pp. 519–541. DOI: 10.1007/s00291-010-0200-9
6. *Fan X.N., Zhi B.* Design for a crane metallic structure based on imperialist competitive algorithm and inverse reliability strategy // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 30. Pp. 900–912. DOI: 10.1007/s10033-017-0139-8
7. *Domazet T., Lukša F., Bugarin M.* Failure of two overhead crane shafts // *Engineering Failure Analysis*. 2014. Vol. 44. Pp. 125–135. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.05.001
8. *Alam M.R., Hassan S.F., Amin M.A., Arif-Uz-Zaman K., Karim M.A.* Failure Analysis of a Mobile Crane: A Case Study // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2018. Vol. 18. No. 3. Pp. 545–553. DOI: 10.1007/s11668-018-0437-1
9. *Ma B., Fang Y., Zhang Y.* Switching-based emergency braking control for an overhead crane system // *IET Control Theory & Applications*. 2010. Vol. 4. No. 9. Pp. 1739–1747. DOI: 10.1049/iet-cta.2009.0277
10. *Shin J.H., Lee D.H., Kwak M.K.* Vibration suppression of cart-pendulum system by combining the input-shaping control and the position-input position-output feedback control // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019. Vol. 33. No. 12. Pp. 5761–5768. DOI: 10.1007/s12206-019-1120-5
11. *Ursavas E.* Crane allocation with stability considerations // *Maritime Economics & Logistics*. 2017. Vol. 19. No. 2. Pp. 379–401. DOI: 10.1057/mel.2015.35
12. *Синельщиков А.В., Джалмухамбетов А.И.* Развитие методов расчета устойчивости башенных кранов // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 12 (111). С. 1342–1351. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.12.1342-1351
13. *Stürzer D., Arnold A., Kugi A.* Closed-loop stability analysis of a gantry crane with heavy chain and payload // *International Journal of Control*. 2018. Vol. 91. No. 8. Pp. 1931–1943. DOI: 10.1080/00207179.2017.1335439
14. *Scalera L., Gallina P., Seriani S., Gasparretto A.* Cable-Based Robotic Crane (CBRC): Design and Implementation of Overhead Traveling Cranes Based on Variable Radius Drums // *IEEE Transactions on Robotics*. 2018. Vol. 34. No. 2. Pp. 474–485. DOI: 10.1109/TRO.2018.2791593
15. *Adenso-Díaz B., Álvarez N.G., Alba J.A.L.* A fuzzy AHP classification of container terminals // *Maritime Economics & Logistics*. 2020. Vol. 22. No. 2. Pp. 218–238. DOI: 10.1057/s41278-019-00144-4
16. *Pietrosanti S., Harrison I., Luque A., Holderbaum W., Becerra V.M.* Net energy savings in Rubber Tyred Gantry cranes equipped with an active front end // *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. 2016. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555814
17. *Kayhani N., Taghaddos H., Noghabae M., Hermann U.* Utilization of virtual reality visualizations on heavy mobile crane planning for modular construction // *Proceedings of the 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. 2018. DOI: 10.22260/isarc2018/0170
18. *Fazli M., Fathollahi-Fard A., Tian G.* Addressing a coordinated quay crane scheduling and assignment problem by red deer algorithm // *International Journal of Engineering*. 2019. Vol. 32. No. 8. DOI: 10.5829/ije.2019.32.08b.15
19. *Nahavandi N., Behjat S.* A mathematical model and grouping imperialist competitive algorithm for integrated quay crane and yard truck scheduling problem with non-crossing constraint // *International*

Journal of Engineering. 2019. Vol. 32. No. 10. DOI: 10.5829/ije.2019.32.10a.16

20. Peng Q., Cheng W., Jia H., Guo P. Fragility analysis of gantry crane subjected to near-field ground motions // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. No. 12. P. 4219. DOI: 10.3390/app10124219

21. Frendo F. Gantry crane derailment and collapse induced by wind load // Engineering Failure Analysis. 2016. Vol. 66. Pp. 479–488. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.05.008

22. Solihin M.I., Lim W.H., Tiang S.S., Ang C.K. Modified particle swarm optimization for robust anti-swing gantry crane controller tuning // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2021. Pp. 1173–1192. DOI: 10.1007/978-981-15-5281-6\_83

23. Ha S., Ku N., Roh M.-I. Event-based scenario manager for multibody dynamics simulation of heavy load lifting operations in shipyards // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering.

2016. Vol. 8. No. 1. Pp. 83–101. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2015.10.004

24. Джафари М., Кудрявцев Е.М. Gantry crane trolley dynamic analysis // Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы : 24-я Московская междунар. межвузовская науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. М., 2020.

25. Jafari M., Toloei A. Simulation of strap-on boosters separation in the atmosphere // International Journal of Engineering. 2015. Vol. 28. No. 2 (B). DOI: 10.5829/idosi.ije.2015.28.02b.01

26. Kudryavtsev E., Gavrilenko A., Jafari M. Modeling of dynamic loadings on a tower crane jib // MATEC Web of Conferences. 2020. Vol. 329. P. 03031. DOI: 10.1051/mateconf/202032903031

27. Кудрявцев Е.М., Степанов М.А. Строительные краны. М. : Изд-во АСВ, 2016. 329 с.

Поступила в редакцию 9 января 2021 г.

Принята в доработанном виде 17 мая 2021 г.

Одобрена для публикации 17 мая 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Мостафа Джафари** — аспирант кафедры механизации строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; mostafa.jafari@mail.ru;

**Евгений Михайлович Кудрявцев** — доктор технических наук, профессор кафедры механизации строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 691899; sdm@mgsu.ru.

## Подходы к реализации гидравлических электронных моделей централизованных систем водоснабжения

Г.Н. Громов<sup>1,2</sup>, Д.Д. Худякова<sup>1,2</sup>, К.Г. Пьянков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*

<sup>2</sup> *АО «МосводоканалНИИпроект»; г. Москва, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Анализ российских нормативно-методических документов, а также научных статей показывает наличие пробелов в разработке и практической реализации гидравлических электронных моделей существующих систем водоснабжения. В руководстве пользователя программных продуктов, которые используются при построении моделей, приведены возможности модулей программного обеспечения без описания результатов их применения при реализации конкретных примеров. Постановление Правительства РФ от 05.09.2013 № 782, как документ, регламентирующий построение электронных моделей систем водоснабжения, лишь содержит в себе требования к программному обеспечению. Нормативный документ СП 31.13330.2012 включает требования к проведению гидравлических расчетов проектируемых систем водоснабжения. Все это говорит о том, что в российском нормативном поле отсутствует документ, регламентирующий основные требования к построению и детализации гидравлических электронных моделей систем водоснабжения. Это является важной проблемой для городского коммунального хозяйства в связи с тем, что гидравлическая электронная модель служит основой разработки мероприятий схемы, в строгом соответствии с которой проводится развитие городской централизованной системы водоснабжения.

**Материалы и методы.** Приведен научный обзор состояния проблемы разработки и реализации гидравлических электронных моделей централизованных систем водоснабжения, предлагаются основные принципы и подходы к построению электронных моделей.

**Результаты.** Представлено подробное описание методики разработки модели систем водоснабжения городов, а также требования, предъявляемые зарубежными стандартами.

**Выводы.** Структурирована информация о построении и калибровке модели, необходимая для приведения к соответствию данных разрабатываемой модели и работы реальной системы водоснабжения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** система, водоснабжение, водопроводная сеть, гидравлическая электронная модель, алгоритм, калибровка, гидравлический расчет, реализация

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Громов Г.Н., Худякова Д.Д., Пьянков К.Г. Подходы к реализации гидравлических электронных моделей централизованных систем водоснабжения // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 5. С. 623–634. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.623-634

## Approaches to the implementation of hydraulic electronic models of centralized water supply systems

Grigory N. Gromov<sup>1,2</sup>, Darya D. Khudyakova<sup>1,2</sup>, Kirill G. Pyankov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation;*

<sup>2</sup> *MosvodokanalNIIProjekt JSC; Moscow, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** The analysis of the Russian normative and methodological documents, as well as research articles, has identified gaps in the development and practical implementation of hydraulic electronic models of existing water supply systems. The user guide of the software products, used to design these models, merely demonstrates the capabilities of software modules and misses the outcome of their application in certain cases. Decree No. 782 issued by the RF Government on September 5, 2013, being the document that regulates the development of electronic models of water supply systems, lists the requirements applied to software. The document, titled Construction regulations SP 31.13330.2012, has the requirements applicable to the hydraulic analysis of water supply system designs. This suggests that the Russian regulatory environment has no document that contains the basic requirements governing the development and detailing of hydraulic electronic models of water supply systems. This is an essential problem of urban utility networks, since the hydraulic electronic model is the basis for any further actions in strict accordance with which a development plan of a centralized urban water supply system is designed.

**Materials and methods.** The article has a scientific review of the problem of design of electronic hydraulic models of centralized water supply systems and basic principles and approaches to electronic model generation.

**Results.** The co-authors provide a detailed description of a methodology used to develop a model of urban water supply systems as well as the requirements set by foreign standards.

**Conclusions.** Model development and calibration is structured in the article. This information is needed to adjust the characteristics of the designed model to a water supply system in operation.

**KEYWORDS:** system, water supply, water supply network, electronic hydraulic model, algorithm, calibration, hydraulic analysis, implementation

**FOR CITATION:** Gromov G.N., Khudyakova D.D., Pyankov K.G. Approaches to the implementation of hydraulic electronic models of centralized water supply systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(5): 623-634. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.5.623-634 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Анализ современных российских нормативно-методических документов и научных статей показывает наличие пробелов в разработке и практической реализации построения гидравлических электронных моделей систем подачи и распределения воды [1–6].

Документ, регламентирующий построение моделей схем и электронных систем водоснабжения и водоотведения (Постановление Правительства РФ от 05.09.2013 № 782 «О схемах водоснабжения и водоотведения»<sup>1</sup>), лишь описывает требования к программному обеспечению и не уделяет внимание практическим моментам построения электронной модели. В свою очередь, требования, приведенные в СП 31.13330.2012<sup>2</sup>, относятся к вновь проектируемым системам без учета нюансов расчета существующих действующих систем водоснабжения.

Тем самым в российском нормативном поле отсутствует документ, который бы регламентировал основные требования к гидравлическим электронным моделям систем водоснабжения.

Это — важная проблема для городского коммунального хозяйства, в связи с тем, что гидравлическая электронная модель является основой разработки схемы, в строгом соответствии с которой проводится развитие городской централизованной системы водоснабжения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Приведен научный обзор состояния проблемы разработки и реализации гидравлических электронных моделей централизованных систем водоснабжения, а также предлагаются основные принципы и подходы к построению электронных моделей.

В ходе написания статьи использовались российские и зарубежные нормативные документы, примеры реализации моделей, а также опыт разработки схем водоснабжения и электронных моделей институтом АО «МосводоканалНИИпроект».

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из данных литературных источников [7, 8], а также возможностей современных про-

граммных комплексов (например, Zulu, Mike Urban<sup>3</sup>, Bentley, CityCom – ГидроГраф) можно предложить следующее разделение категорий электронных гидравлических моделей систем водоснабжения по:

- типу рассматриваемых систем: водоснабжение, водоотведение, дождевая канализация;
- типу проводимых расчетов: гидравлическая модель; модель оценки качества воды; модель оценки энергоэффективности работы оборудования; моделирование гидравлического удара;
- охватываемому периоду моделирования: расчет системы на определенный час или определенные условия (Steady state); расчет системы на расширенный (24-часовой) режим (Extended period simulation);
- степени детализации: укрупненные модели, детализированные модели.

Построение электронных моделей систем водоснабжения заключается в применении следующего подхода [9]:

1. Разработка расчетной схемы модели.
2. Разработка балансовой характеристики модели.
3. Проведение предварительных расчетов системы.
4. Калибровка гидравлической модели.

Стоит отметить, что, несмотря на различия между работой систем водоснабжения и водоотведения, основные этапы построения электронных моделей для данных систем являются идентичными.

Разработка расчетной схемы заключается в:

- выборе типа расчетной схемы (укрупненной или детализированной) в зависимости от решаемых задач;
- формировании топологии сети в программный комплекс;
- создании электронных баз данных характеристик элементов для проведения гидравлических расчетов.

Разработка балансовой характеристики модели заключается в разработке балансовой схемы в соответствии с принятым типом расчетной схемы. В ходе этого этапа проводится анализ балансов потребления воды в городе. Итогом является форми-

<sup>1</sup>О схемах водоснабжения и водоотведения: Постановление Правительства РФ от 05.09.2013 № 782.

<sup>2</sup>СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения (Изменение 5).

<sup>3</sup>Руководство пользователя DHI MIKE URBAN. 2016. С. 216. URL: <https://echyden.ru/programmy/gorodskie-seti-i-os3/mike-urban/>

рование определенных значений расхода на каждом потребителе, который приведен в модели.

Осуществление поверочных предварительных расчетов системы заключается в исправлении ошибок и неточностей в электронной модели. Цель данного этапа — запуск расчета в программном комплексе.

Калибровка гидравлической модели состоит во внесении различных изменений в модель для точного соответствия модели работе системы на основе проведения серий измерений на сети.

Разработка расчетной схемы сети (рис. 1) основывается на геоподоснове в масштабе М 1:500, которая предоставляется в качестве исходных данных. Для возможности привязки схемы сети водоснабжения или водоотведения к плану местности необходимо воспользоваться функциями современных программных комплексов и подгрузить в программу топографические планшеты, геоподоснову или другую необходимую графическую информацию.

Основными элементами водопроводной сети при построении гидравлической модели являются [7]:

1. Резервуар (источник водоснабжения).
2. Участок водопроводной сети.
3. Узел (водопроводные колодцы, разветвления, потребитель).
4. Регулятор давления.
5. Насосные агрегаты.
6. Запорная арматура.

Для построения гидравлической модели, согласно работе Water distribution system Analysis: Field Studies, Modeling and Management<sup>4</sup>, необходима следующая информация:

- характеристики элементов водопроводной сети (трубопроводы, насосные агрегаты, резервуары, регулирующая арматура);

- расходы воды потребителей, назначенные в соответствующие узлы сети. При проведении гидравлических расчетов на расширенный (24-часовой) режим системы необходимо указание графиков потребления воды в соответствии с типом потребителя (школа, жилой дом, промышленное предприятие и др.);

- топографическая информация (геодезические отметки в узловых точках сети, координаты);
- информация об управлении системой (например, режим работы насоса);
- логика принимаемых решений диспетчерами.

### Выбор типа разрабатываемой расчетной схемы

Для построения гидравлической электронной модели в первую очередь выполняется разработка расчетной схемы сети водоснабжения города в формате ГИС.

Предлагается использование расчетных схем двух видов: детализированной и укрупненной.

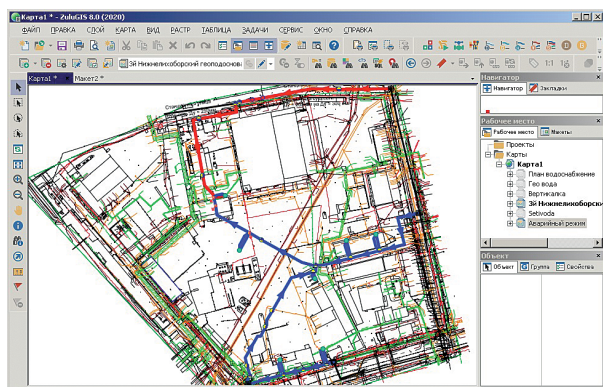
Детализированная расчетная схема сети включает все элементы СПРВ (трассировка трубопроводов, информация о расходах потребителей и абонентов системы, схемы насосных станций, центральных тепловых пунктов и др.). Для построения расчетной схемы необходимы значительные объемы информации о состоянии системы водоснабжения города, при этом полный сбор таких данных может занимать продолжительное время [3, 4].

При построении укрупненной расчетной схемы сети используется условная схема водоотбора, при которой отбор воды из сети представлен нефиксированными узловыми отборами.

Укрупненная гидравлическая электронная модель включает в себя основные магистральные трубопроводы, сосредоточенные (крупные водопотребители) и фиктивные узловые отборы, а также основную информацию о сооружениях системы (насосных станциях первого, второго и третьего подъема). При численности населения города более 500 тысяч человек основой расчетной схемы являются трубопроводы диаметром 300 мм и более. При разработке укрупненной модели расстановка фиктивных узловых отборов проводится в местах пересечения основных магистральных трубопроводов, а также в местах расположения крупных потребителей воды.

Формирование расчетной схемы сети включает топологию сети, а также требуемую информацию для проведения гидравлического расчета. В табл. 1 представлено сравнение разработанных при участии авторов характеристик расчетных гидравлических моделей систем водоснабжения городов Пензы, Тюмени, Салавата.

Выбор типа расчетной схемы электронной модели должен осуществляться на основании целей моделирования, количества доступных исходных



**Рис. 1.** Разработка гидравлической системы водоснабжения на основе геоподосновы в программном обеспечении Zulu<sup>5</sup>

**Fig. 1.** Using a geological study to develop a hydraulic water supply system in the Zulu software<sup>5</sup>

<sup>4</sup> Water distribution system Analysis: Field Studies, Modeling and Management. A reference guide for utilities. U.S. Environmental Protection Agency, December 2005.

<sup>5</sup> СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения (Изменение 5).

**Табл. 1.** Сравнение характеристик, укрупненных и детализированных электронных моделей, по количеству элементов  
**Table 1.** Characteristics, generalized and detailed electronic models compared in the number of elements

| Город<br>Town      | Численность населения, тыс. чел.<br>Population, thousand residents | Тип модели<br>Model type     | Количество элементов<br>Number of elements | Длина трубопроводов, включенных в расчет, км<br>Length of analyzed pipelines, km |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Пенза<br>Penza     | 465,0                                                              | Укрупненная<br>Generalized   | 2805                                       | 330,8                                                                            |
| Тюмень<br>Tumen    | 697,7                                                              | Детализированная<br>Detailed | 92 258                                     | 1616,4                                                                           |
| Салават<br>Salavat | 153,9                                                              | Детализированная<br>Detailed | 39 552                                     | 648,4                                                                            |

данных, а также необходимого срока реализации модели.

Если говорить о допустимой степени детализации укрупненных электронных моделей, то в российских нормативных актах указания не представлены. В соответствии с работой Water distribution system Analysis: Field Studies, Modeling and Management<sup>5</sup>, согласно зарубежным стандартам, укрупненные модели систем водоснабжения должны содержать:

- как минимум 50 % общей длины трубопроводов распределительной сети;
- как минимум 75 % общего расхода распределительной сети;
- все трубопроводы диаметром 12 дюймов (Ду 300 мм) и более
- все трубопроводы диаметром 8 дюймов (Ду 200 мм) и более, которые соединяют зоны водоснабжения, зоны влияния различных источников водоснабжения, резервуары, основные зоны потребления воды, контрольную запорную арматуру или другие значимые пути транспортировки воды;
- все трубопроводы диаметром 6 дюймов (Ду 150 мм) и более, которые соединяют отдаленные районы распределительной сети с основными магистралями;
- весь резервуарный парк с учетом режимов работы и возможности управления состоянием объекта;
- все насосные станции с учетом реальных режимов работы и возможности управления состоянием объекта;
- все действующие управляющие задвижки или другие элементы системы, оказывающие значительное влияние на работу распределительной сети.

#### **Сбор информации о характеристиках работы сети**

Информацию о существующем состоянии сети и характеристики элементов системы водоснабжения можно получить на основе дефектных ведомостей, исполнительной документации, паспортов

оборудования и анализа других сопутствующих документов.

Для построения модели необходима статистическая почасовая информация по расходам воды на насосных станциях, уровням воды в резервуарах и данным манометров, установленных в различных частях городской сети.

В том числе, отдельно требуется выполнение замеров непосредственно на сети города.

Сбор данных для верификации и калибровки модели, согласно работе [10], можно разделить на две составляющие: измерения на сети (field tests) и гидравлические испытания.

В ходе проведения измерений на водопроводной сети должны быть получены такие данные, как кривые характеристики работы насосных агрегатов, шероховатость трубопроводов, расходы воды на сети, расходы воды потребителей, уровни воды в резервуарах и т.д.

В результате осуществления натурных измерений на сети могут быть обнаружены неизвестные закрытые задвижки, трубопроводы с высоким значением зарастания и другие проблемные участки системы водоснабжения.

При измерении и испытании на сети необходимо:

- предварительное планирование и четкое понимание целей проведения измерений и испытаний на сети;
- консультации с эксплуатирующим персоналом и пожарными службами. Согласование планируемых мероприятий в данном случае является достаточно важным моментом;
- предварительная проверка всего оборудования, которое будет использовано в процессе измерений и испытаний.

Эффективным инструментом в части планирования и измерений на сети и гидравлических испытаний является анализ топологии системы водоснабжения с точки зрения определения границ зон водоснабжения, основных магистральных трубопроводов и сооружений системы.

Использование топологии сети в задачах планирования проведения измерений может быть необходимо при определении мест расположения датчиков давления или установки оборудования по измерению расхода воды.

При построении модели системы для возможности расчета баланса подачи и потребления воды в зонах водоснабжения желательно оборудовать их входы и выходы точками измерения расхода. В данном случае ключевыми точками будут — насосные станции, регуляторы давления на сети, магистрали, с помощью которых осуществляется подача воды в зону водоснабжения.

Перед проведением измерений и испытаний нужна предварительная проверка и калибровка используемого оборудования.

С целью выбора оптимального количества точек измерения и мест их расположения следует сформулировать оптимизационную задачу. Суть проблемы заключается в том, что с одной стороны с помощью установки дополнительных точек измерения должно быть максимизировано количество собираемой информации (количество значений расхода и давления) на водопроводной сети, а с другой стороны имеются ограничения по количеству и возможности установки приборов, а также бюджету, выделяемому на испытания.

Стоит отметить, что установка большого количества точек измерения на водопроводной сети не всегда оказывает влияние на результат гидравлического моделирования систем водоснабжения. Для решения указанной оптимизационной проблемы применяются различные подходы и техники, в том числе с использованием оптимизационных алгоритмов. Описание некоторых работ в данной области приведено в *Water distribution system Analysis: Field Studies, Modeling and Management. A reference guide for utilities*<sup>5</sup>.

### Калибровка гидравлической электронной модели

Калибровка модели, как было указано выше, заключается в достижении соответствия между данными модели и работой реальной системы водоснабжения.

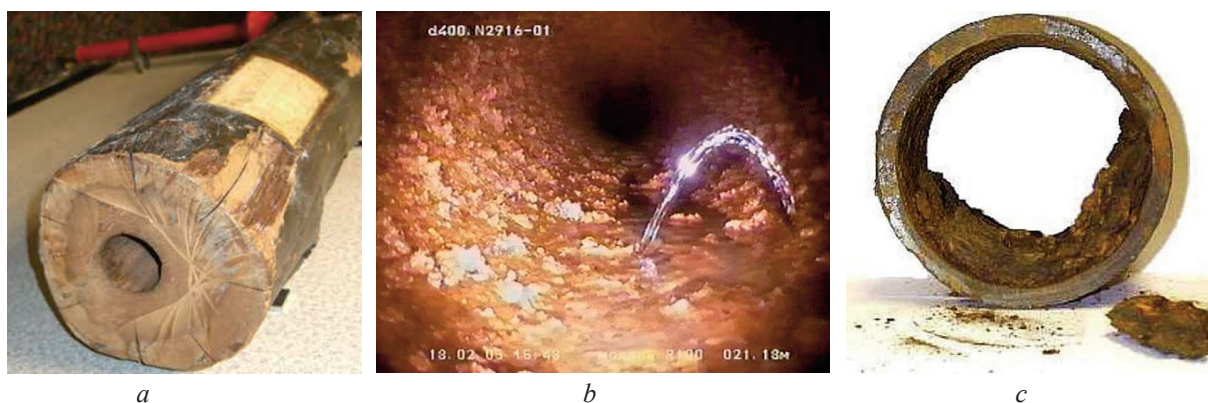
Ключевым моментом здесь являются принятые в модели значения сопротивления элементов системы, которые в свою очередь характеризуются значительной неопределенностью, согласно работе С.Н. Карамбиров *«Совершенство методов расчета систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неполной исходной информации»*<sup>6</sup>.

Также следует отметить, что при расчете проектируемой сети сопротивления элементов (участков трубопроводов) известны и могут быть приняты по справочным данным (например, таблицы Шевелева<sup>7</sup>, справочник Чугаева<sup>8</sup> и др.). Исследования на реальных сетях показали, что при расчете существующей сети сопротивление участков может отличаться от табличных значений. В этой связи следует отметить, что порядка 70 % трубопроводов в городах и поселениях России являются стальными. Стальные трубопроводы без соответствующей защиты — наиболее уязвимы для внутренней и внешней коррозии (рис. 2, *a, b, c*). В свою очередь, внутренняя коррозия служит основной причиной изменения гидравлического сопротивления стальных трубопроводов.

<sup>5</sup> Карамбиров С.Н. Совершенство методов расчета систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неполной исходной информации : автореф... дис. ...д-ра техн. наук. М., 2005. 46 с.

<sup>7</sup> Шевелев Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета. 2012.

<sup>8</sup> Чугаев Р.Р. Гидравлика : учебник для вузов. 4-е изд., доп. и перераб. Л. : Энергоиздат, Ленинград. отд-ние, 1982. 672 с.



**Рис. 2.** Состояние трубопроводов в системах водоснабжения: *a* — калибровка может помочь службам Водоканала найти места, где их трубопроводы представляют собой старые просверленные насквозь деревья\*; *b* — свищ с инфильтрацией; *c* — отложения на поверхности трубы [7]

**Fig. 2.** The condition of pipelines of the water supply system: *a* — caliibration can help water authority officers to locate pipeline sections that represent old tree roots that pass through the pipe; *b* — inflow seepage; *c* — pipeline surface sediments [7]

\* Committee Report: Defining model calibration, Model Calibration Subcommittee of the Engendering // Journal AWWA. July 2013. Pp. 60–63. DOI: 10.5942/jawwa.2013.105.0101

В целом стоит отметить, что на расхождение между электронной моделью системы и фактическими данными работы сети может оказывать влияние достаточно большое количество факторов [8]:

- неправильно занесенная топология сети;
- неправильное отображение в модели границ зон водоснабжения;
- принятые упрощения и предположения при разработке модели;
- ошибки при занесении информации по объектам системы (например, отметки земли, длины и диаметра трубопроводов, характеристики работы регулирующей арматуры, др.);
- неправильно занесенный уровень в регулирующих резервуарах;
- указание неверных данных работы регуляторов давления;
- указание неверных характеристик работы насосных агрегатов;
- изменение гидравлических характеристик элементов сети с течением времени (рост сопротивления трубопроводов, изменение Q-H характеристики работы насосов, изменение величины отборов воды);
- неверное распределение расходов воды в системе по отношению к реальному потреблению воды;
- ошибки в высотных отметках при учете данных датчиков измерения давления;
- скрытые утечки в сети.

Все это говорит о необходимости проведения этапа калибровки при разработке электронной модели, который заключается во внесении различных изменений в модель с целью снижения расхождения между данными, полученными в результате расчета, и измеренными данными работы сети.

С математической точки зрения калибровка модели состоит в минимизации объектной функции, которая отражает степень сходимости модели относительно эксплуатационных данных сети. В работе [11] приведено уравнение такой функции:

$$E = \sum_{i=1}^P w_h (h_i^m - h_i)^2 + \sum_{i=1}^Q w_q (q_i^m - q_i)^2 + \sum_{k=1}^N w_p (p_i^m - p_i)^2, \quad (1)$$

где  $P$  и  $Q$  — количество измерений давления и расхода соответственно;  $h_i^m$  — измеряемый напор в узле  $i$ ;  $h_i$  — расчетный напор в узле  $i$ ;  $q_i^m$  — измеряемый расход в  $i$ -трубе;  $q_i$  — расчетный расход в  $i$ -трубе;  $p_i^m$  — априорная оценка (псевдоизмерение);  $p_i$  — априорная оценка;  $N$  — количество априорных оценок;  $w$  — весовой фактор для давления/расхода и часть априорной оценки.

Понятие априорных оценок было сформулировано в работе Z. Kapelan «Calibration of Water Distribution System Hydraulic Models. University of Exeter:

School of engineering and computer science»<sup>9</sup>. Априорной оценкой являются предшествующие измерения, отличающиеся от тех, которые рассматриваются в данном процессе калибровки. Это необходимо для увеличения скорости сближения и повышения точности измеряемых параметров. Следует отметить, что в работе Z. Kapelan не приведены четкие правила использования априорных оценок, в связи с чем в практике они не используются.

По своей сути, объектная функция  $E$  представляет собой сумму квадратичных разностей между фактическими данными работы сети и данными моделирования по расходу и свободному напору. Поэтому эта функция отражает сходимость модели с работой реальной сети. Соответственно, задача калибровки заключается в минимизации этой функции [12].

Стоит отметить, что в различных литературных источниках [7, 13], работе «Quo vadis water distribution model calibration?»<sup>10</sup>, а также [14] рассматриваются различные виды объектной функции. Четких и однозначных правил выбора вида объектной функции на текущий момент нет. Поэтому выбор вида объектной функции зависит от конкретной решаемой задачи, качества эксплуатационных данных и предпочтений разработчика модели.

Согласно исследованию [8], существенной проблемой, стоящей перед разработчиком модели при проведении этапа калибровки модели, является определение отправной точки начала работ, поскольку потенциальное количество изменений, которое можно произвести на первоначальном этапе, может быть значительным.

Достаточно точно отмечено в работе «Committee Report: Defining model calibration, Model Calibration Subcommittee of the Engendering»<sup>9</sup>, что очень важно, чтобы разработчик модели понимал, почему корректируется тот или иной параметр, прежде чем будет проведена корректировка модели (рис. 3). Корректировка неправильного параметра (например, изменение шероховатости трубопровода, в случае, когда причиной расхождения модели была неправильно указанная высотная отметка элемента сети) может привести к тому, что модель, которая имеет высокую степень сходимости, при ее использовании в других задачах не будет способна обеспечить точный результат.

Такая неправильная корректировка параметров является примером создания в модели компенсации

<sup>9</sup> Kapelan Z. Calibration of Water Distribution System Hydraulic Models. Thesis for: PhD thesis in Engineering from the School of Engineering and Computer Science at the Univ. of Exeter, Advisor: Dragan Savic. 2002.

<sup>10</sup> Savic D.A., Kapelan Z.S., Jonkergouw P.M.R. Quo vadis water distribution model calibration? // Urban Water Journal. Mar 2009. Vol. 6. No. 1. Pp. 3–22. URL: [https://www.researchgate.net/publication/221936223\\_Quo\\_vadis\\_water\\_distribution\\_model\\_calibration](https://www.researchgate.net/publication/221936223_Quo_vadis_water_distribution_model_calibration)

онной ошибки. То есть такой ошибки, которая равна по своему влиянию на значение объектной функции аналогично истинной причине расхождения модели.

Поэтому цель калибровки электронной модели состоит в том, чтобы модель точно повторяла работу системы, а не просто соответствовала некоторым значениям, полученным в результате измерений.

Поэтому при проведении калибровки электронной модели важно разделить работу на этапы путем выделения подмножеств управляемых параметров и последовательной их проверки.

Процедура гидравлической калибровки электронной модели в достаточной степени зависит от нюансов работы сети, количества исходных данных и возможности проведения дополнительных измерений, поэтому достаточно сложно дать последовательность конкретных действий для различных возможных ситуаций.

В этой связи следует отметить работу Томаса Уолски [8], в которой приводится процедура калибровки модели, которая, по своей сути, аналогична этапам детальной разработки, расширения модели системы и включает в себя следующие периоды:

1. Калибровка модели при расчете системы водоснабжения на определенный час или определенные условия (Steady-state normal flow conditions).
2. Калибровка модели при расчете системы водоснабжения на максимальный час водоснабжения (Steady-state high flow conditions).
3. Калибровка модели при расчете системы на расширенный (24-часовой) режим работы при известных данных о диспетчерском управлении (Extended period simulation — known control status).
4. Калибровка модели при расчете системы на расширенный (24-часовой) режим работы при различных управляющих действиях диспетчера (Extended period simulation — varying control status).

Преимуществом предлагаемого Томасом Уолски подхода является то, что на каждом из приведенных этапов предлагается корректировка определенных параметров модели.

Согласно работе «Quo vadis water distribution model calibration?»<sup>4</sup>, алгоритмы калибровки гидравлических моделей могут быть разделены на три категории: «итерационные модели (метод проб и ошибок); развернутые калибровочные модели; неявные калибровочные модели» [15].

При итерационной модели калибровки корректировка исходных данных проводится «ручным» способом. При этом такая корректировка осуществляется на каждом этапе работы. Упрощение сети является основой данного метода, в связи с большими временными затратами на выполнение калибровки модели.

В этой связи стоит упомянуть о «Модели коррозионного зарастания внутреннего сечения металлических трубопроводов», предложенной В.И. Щербаковым в работе «Анализ, техническая диагно-

стика и реновация систем подачи и распределения воды на основе принципов энергетического эквивалентирования»<sup>11</sup>.

Развернутые калибровочные модели основываются на решении расширенного набора уравнений массового и энергетического баланса. Примером такого алгоритма калибровки модели является «Математический расходомер», предложенный в рамках теории гидравлических цепей.

Неявные калибровочные модели основываются<sup>12</sup> на решении оптимизационной проблемы типа взвешенных наименьших квадратов с целью ее минимизации. В практике использования программных продуктов (Mike Urban, Bentley) применяются неявные (оптимизационные) калибровочные модели.

Для наилучшего соответствия полевых измерений данным модели в программном обеспечении Mike Urban и Bentley представлен калибровочный модуль<sup>3</sup>. Используемый алгоритм (генетический алгоритм) является грубым упрощением процессов, происходящих в природе. Основная идея работы алгоритма — имитация дарвиновской теории эволюции. Подробное описание работы генетических алгоритмов для калибровки гидравлических электронных моделей приведено в работах [16, 17].

Стоит отметить, что генетический алгоритм является достаточно мощным инструментом при выполнении калибровки электронной модели. Однако и в его работе есть минусы, которые могут повлиять на разработку адекватной электронной модели:

1. В качестве исходных данных алгоритму указываются элементы на сети водоснабжения (например, определенные, выбранные пользователем трубопроводы) и диапазон значений характеристики, конкретное значение которой неизвестно (например, эквивалентная шероховатость выделенных трубопроводов может варьироваться в диапазоне от 1 до 7 мм). Это показывает, что результат работы алгоритма зависит от заданных пользователем данных.

2. При задании значительного количества неизвестных (шероховатость трубопроводов, места возникновения утечек и др.) время работы алгоритма достаточно велико, а самое главное — оптимальное решение в результате его работы может быть не найдено.

В связи с тем, что при значительном количестве неизвестных генетический алгоритм может не найти оптимальное решение, в руководствах пользователя Mike Urban и Bentley предлагается

<sup>11</sup> Щербаков В.И. Анализ, техническая диагностика и реновация систем подачи и распределения воды на основе принципов энергетического эквивалентирования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж : Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, 2002. 346 с.

<sup>12</sup> Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. М. : Наука, 1985. С. 148–154.

группировка элементов по схожему признаку. Например, группировка трубопроводов по материалу, как представлено в труде [7].

Также в рамках рассмотрения неявных калибровочных моделей отдельного внимания заслуживает функциональная зависимость шероховатости трубопровода от года прокладки, представленная в работах [18, 19]. В данном случае используются линейные и нелинейные зависимости, которые предлагаются

для калибровки модели системы водоснабжения, содержащей трубопроводы различного возраста.

Подводя итог, необходимо отметить, что калибровка — важный этап разработки модели. Модель всегда будет отличаться от характеристик работы системы по ряду различных причин.

В какой момент необходимо остановиться и закончить работу над калибровкой модели? Ответ на этот вопрос приведен в работе [8] — никогда.

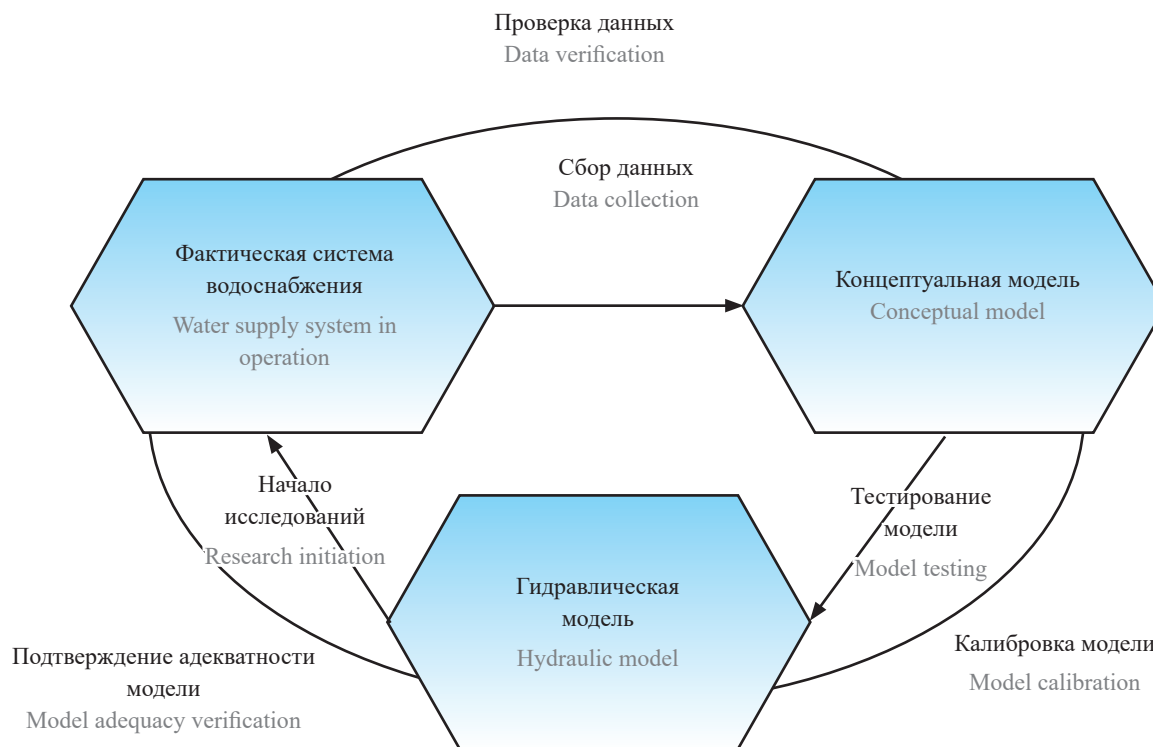


Рис. 3. Схема процедуры создания гидравлической модели [20]

Fig. 3. Hydraulic model design process [20]

Калибровка модели является постоянным итеративным процессом в связи с тем, что организация, осуществляющая водоснабжение города, постоянно проводит ряд работ по ремонту и реконструкции существующих сетей, а также подключению новых объектов. Все это требует внесения постоянных изменений и уточнений в модель. В том числе, очевидно, что нельзя охватить приборами измерения все элементы сети водоснабжения.

В этом случае правильно поставить вопрос следующим образом: удовлетворяет ли точность разработанной электронной модели целям дальнейшего ее использования. Поэтому в зависимости от различных целей электронная модель может иметь различную степень сходимости и степень детализации.

С другой стороны, в публикации [5] приводятся требования немецких нормативов к разработанным гидравлическим моделям (табл. 2).

Табл. 2. Минимальное количество требуемых точек измерения напора при калибровке гидравлических моделей [5]

| Протяженность сети, км<br>Network length, km | Количество точек измерения напора<br>Number of pressure measurement points |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Менее 100                                    | 20–30                                                                      |
| 100–200                                      | 30–50                                                                      |
| 200–400                                      | 50–70                                                                      |
| 400–800                                      | 70–1                                                                       |

В работе [5] также приведена рекомендуемая точность определения напоров при калибровке, согласно немецким нормативам, которая составляет  $\pm 1$  м, потери напора  $\pm 0,5$  м, и сделан следующий вывод: «В российских условиях с учетом применяемых приборов и состояния сетей предлагается временно ограничиться точностью определения напоров  $\pm 2,5$  м» [5].

В работе «Water distribution system Analysis: Field Studies, Modeling and Management. A reference guide for utilities»<sup>4</sup> приведены критерии качества разработки модели СПРВ, согласно Water Authorities Association and WRc.

Расхождения модели и данных измерений по расходу:

- $\pm 5$  % измеренного расхода, когда значение расхода составляет более  $\pm 10$  % от общего потребления системой водоснабжения;

- $\pm 10$  % от измеренного расхода, когда значение расхода составляет менее  $\pm 10$  % от общего потребления системой водоснабжения.

Расхождения модели и данных измерений по давлению:

- 0,5 м или 5 % потери напора для 85 % измерений давления;
- 0,75 м или 7,5 % потери напора для 95 % измерений давления;
- 2 м или 15 % потери головы на 100 % измерений давления.

В работе «Water distribution system Analysis: Field Studies, Modeling and Management. A reference guide for utilities»<sup>4</sup> также приведены критерии оценки модели системы водоснабжения, согласно AWWA Engineering Computer Applications Committee (табл. 3, 4).

Табл. 3. Предварительные критерии оценки модели<sup>1</sup>  
Table 3. Preliminary model evaluation criteria<sup>1</sup>

| Использование модели<br>Model application        | Степень детализации модели<br>Degree of model detailing | По охватываемому периоду моделирования<br>Modeling period | Количество показаний значения давления<br>Number of pressure measurements | Точность показаний давления<br>Pressure measurement accuracy             | Количество показаний значения расхода<br>Number of flow rate measurements | Точность показаний расхода<br>Flow rate measurement accuracy |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Долгосрочное планирование<br>Long-term planning  | Низкая<br>Low                                           | SS* или EPS**<br>SS* or EPS**                             | 10 % узловых точек<br>10 % of measurement points                          | $\pm 3,5$ м для 100 % измерений<br>$\pm 3.5$ m for 100 % of measurements | 1 % труб<br>1 % of pipes                                                  | $\pm 10$ %                                                   |
| Проектирование<br>Design                         | От средней до высокой<br>Medium to high                 | SS* или EPS**<br>SS* or EPS**                             | 5–2 % узловых точек<br>5–2 % of measurement points                        | $\pm 1,4$ м для 90 % измерений<br>$\pm 1.4$ m for 90 % of measurements   | 3 % труб<br>3 % of pipes                                                  | $\pm 5$ %                                                    |
| Эксплуатация<br>Operation                        | От низкой до высокой<br>Low to high                     | SS* или EPS**<br>SS* or EPS**                             | 10–2 % узловых точек<br>10–2 % of measurement points                      | $\pm 1,4$ м для 90 % измерений<br>$\pm 1.4$ m for 90 % of measurements   | 2 % труб<br>2 % of pipes                                                  | $\pm 5$ %                                                    |
| Оценка качества воды<br>Water quality assessment | Высокая<br>High                                         | EPS                                                       | 2 % узловых точек<br>2 % measurement points                               | $\pm 2,1$ м для 90 % измерений<br>$\pm 2.1$ m for 90 % of measurements   | 5 % труб<br>5 % of pipes                                                  | $\pm 2$ %                                                    |

Примечание. \* — SS (Steady-State) — расчет системы водоснабжения на определенный час или определенные условия;  
\*\* — EPS (Extended period simulation) — расчет системы на расширенный (24-часовой) режим

Note: \* — SS (Steady-State) — water supply system adjustment to a specific hour mode or particular conditions;  
\*\* — EPS (Extended period simulation) — calculating the system in extended (24-hour) mode

Табл. 4. Необходимое количество измерений давления при различной детализации модели<sup>1</sup>Table 4. The required number of pressure measurements with different model details<sup>1</sup>

| Степень детализации модели<br>Degree of model detailing | Количество показаний значения давления<br>Number of pressure measurements |
|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Низкая / Low                                            | 10 % узловых точек / 10 % of measurement points                           |
| Средняя / Medium                                        | 5 % узловых точек / 5 % of measurement points                             |
| Высокая / High                                          | 2 % узловых точек / 2 % of measurement points                             |

Несмотря на представленные критерии оценки качества разработанной модели, следует еще раз повторить, что простое соответствие модели значениям измерений можно достичь путем включения в модель компенсационных ошибок, что, в свою очередь, приведет к невозможности использования результатов моделирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На текущий момент в российских нормативных документах отсутствуют требования к построению и реализации электронных моделей систем водоснабжения. Анализ российских литературных источников показывает немногочисленные статьи по проблеме практической реализации построения электронной модели.

Цели и задачи данной работы — описание методики построения и калибровки модели для соответствия модели показателей работы системы водоснабжения города.

Предлагается использовать следующий подход построения электронной модели:

1. Разработка расчетной схемы модели.
2. Разработка балансовой характеристики модели.
3. Проведение предварительных расчетов системы.
4. Калибровка гидравлической модели.

В статье приведено подробное описание каждого этапа разработки модели, а также приведены зарубежные требования к детализации и степени калибровки модели.

Представленный подход позволит провести построение гидравлической электронной модели системы водоснабжения города, более подробно и качественно, что, в свою очередь, повлияет напрямую на качество и точность проведения анализа существующего положения и в дальнейшем на разработку плана мероприятий, направленного на улучшение работы системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Егорова Ю.А., Коневский Е.В., Васьковский А.В., Зайко В.А. Опыт использования геоинформационных технологий и программно-расчетных комплексов при поиске неучтенных потерь воды в системе водоснабжения г. Самары // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 8. С. 45–50.
2. Чупин Р.В., Фам Н.М. Оптимизация структуры и параметров развивающихся систем группового водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 1. С. 30–37.
3. Шишов С.Ю., Иванов В.М., Бычков Д.А., Незамаев Е.А. Гидравлическая модель для контроля и управления режимом работы системы водоснабжения г. Тюмени // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 6. С. 59–65.
4. Шушкевич Е.В., Бастрыкин Р.И., Алешина Е.В., Безрукова М.Р. Управление системой водоснабжения г. Москвы: опыт реализации гидравлического моделирования водопроводной сети // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 3–1. С. 4–9.
5. Юдин М.Ю., Хямляйнен М.М., Смирнова С.В., Русанова Е.В. О правилах разработки электронных моделей систем водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 3. С. 48–52.
6. Егорова Ю.А., Коневский Е.В., Васьковский А.В., Зайко В.А. Определение скрытых потерь воды на водопроводных сетях г. Самары путем построения и калибровки гидравлической модели // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 1. С. 33–38.
7. Некрасов А.В. Компьютерное моделирование гидродинамических процессов систем водоснабжения : учебное пособие. Екатеринбург : Изд-во Уральского ун-та, 2014. С. 309.
8. Walski T. Procedure for hydraulic model calibration // Journal — American Water Works Association. 2017. Vol. 109. Pp. 55–61. DOI: 10.5942/jawwa.2017.109.0075
9. Примин О.Г., Громов Г.Н. Разработка электронной модели систем водоснабжения и водоотведения и ее реализация на примере российского города // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 4. С. 44–51.
10. Robinson L., Edwards J.A., Willnow. Computer modeling of water distribution systems // AWWA MANUAL M32. Third Edition ed. Denver: American Water Works Association. 2012. P. 249. URL: <https://www.awwa.org/portals/0/files/publications/documents/toc/M32ed3.pdf>

11. *Puust R., Kapelan Z., Savic D.A., Koppel T.* A review of methods for leakage management in pipe // *Urban Water Journal*. 2010. Vol. 7. No. 1. Pp. 25–45. DOI: 10.1080/15730621003610878

12. *Примин О.Г., Громов Г.Н., Тен А.Э.* Алгоритмы построения и калибровки электронных моделей системы водоснабжения // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 7 (118). С. 847–854. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.847-854

13. *Annus I., Vassiljev A.* Different approaches for calibration of an operational water distribution system containing old pipes // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 119. Pp. 526–534. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.900

14. *Sophocleous S., Savica D., Kapelan Z., Shen Y., Sage P.* A graph-based analytical technique for the improvement of water network model calibration // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 154. Pp. 27–35. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.415

15. *Примин О.Г., Громов Г.Н., Степанов Д.Л., Козлова О.В.* Калибровка электронной модели системы водоснабжения (на примере водопроводной

сети г. Салавата) // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2018. № 9. С. 4–12.

16. *Wu Z.Y., Wang Q., Butala S., Mi T.* Darwin optimization framework user manual. Watertown, CT06795: Bentley Systems, Incorporated, 2011. Pp. 28–37.

17. *Gromov G.N., Primin O.G.* Use of genetic algorithms for calibration of hydraulic models of water supply systems // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. P. 012108. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012108

18. *Koppel T., Vassiljev A.* Calibration of a model of an operational water distribution system containing pipes of different age // *Advances in Engineering Software*. 2009. Vol. 40. No. 8. Pp. 659–664. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2008.11.015

19. *Koppel T., Vassiljev A.* Use of modelling error dynamics for the calibration of water distribution systems // *Advances in Engineering Software*. 2012. Vol. 45. No. 1. Pp. 188–196. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2011.09.024

20. *Zimoch I., Bartkiewicz E.* Process of hydraulic models calibration // *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 59. P. 00007. DOI: 10.1051/e3sconf/20185900007

Поступила в редакцию 5 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 13 мая 2021 г.

Одобрена для публикации 13 мая 2021 г.

ОБАВТОРАХ: **Григорий Николаевич Громов** — преподаватель кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; начальник отдела научных исследований и инноваций; **АО «МосводоканалНИИпроект»**; 105005, г. Москва, Плетешковский пер., д. 22; РИНЦ ID: 868365, Scopus: 56991330600; gromovgn@mgsu.ru;

**Дарья Дмитриевна Худякова** — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ведущий инженер отдела научных исследований и инноваций; **АО «МосводоканалНИИпроект»**; 105005, г. Москва, Плетешковский пер., д. 22; РИНЦ ID: 1068538; darya.khudyakova.94@mail.ru;

**Кирилл Геннадьевич Пьянков** — инженер 2-й категории отдела Научных исследований и инноваций; **АО «МосводоканалНИИпроект»**; 105005, г. Москва, Плетешковский пер., д. 22; x9017012728@yandex.ru.

## REFERENCES

1. Egorova I.A., Konevskii E.V., Vas'kovskii A.V., Zaiko V.A. The experience of using geographical information technologies and program-calculation complexes in searching unaccounted-for-water losses in the Samara water supply system. *Water Supply and Sanitary Engineering*. 2016; 8:45-50. (rus.).

2. Chupin R.V., Fam N.M. Optimization of the structure and parameters of the developing group water supply systems. *Water Supply and Sanitary Engineering*. 2019; 1:30-37. (rus.).

3. Shishov S.I., Ivanov V.M., Bychkov D.A., Nezamaev E.A. Hydraulic model for monitoring and

control of the Tumen public water supply operation. *Water Supply and Sanitary Engineering*. 2014; 6:59-65. (rus.).

4. Shoushkevich E.V., Bastrykin R.I., Alyoshina E.V., Bezroukova M.R. Moscow water supply management: the experience of introducing hydraulic simulation of the water distribution network. *Water Supply and Sanitary Engineering*. 2013; 3-1:4-9. (rus.).

5. Iudin M.I., Hamalainen M.M., Smirnova S.V., Rusanova E.V. On the rules for developing electronic models of water supply and wastewater disposal systems. *Water Supply and Sanitary Engineering*. 2019; 3:48-52. (rus.).

6. Egorova I.A., Konevskii E.V., Vas'kovskii A.V., Zaiko V.A. Determining latent water losses in the water distribution networks in Samara by hydraulic model development and calibration. *Water Supply and Sanitary Engineering*. 2018; 1:33-38. (rus.).
7. Nekrasov A.V. *Computer modeling of hydrodynamic processes of water supply systems: textbook*. Yekaterinburg, Publishing house of the Ural University, 2014; 309. (rus.).
8. Walski T. Procedure for Hydraulic Model Calibration. *Journal — American Water Works Association*. 2017; 109:55-61. DOI: 10.5942/jawwa.2017.109.0075
9. Primin O.G., Gromov G.N. Designing an electronic model of water supply and wastewater disposal systems and model implementation by the example of a Russian city. *Water Supply and Sanitary Engineering*. 2016; 4:44-51. (rus.).
10. Robinson L., Edwards J.A., Willnow. Computer modeling of water distribution systems. *AWWA MANUAL M32. Third Edition ed*. Denver: American Water Works Association. 2012; 249. URL: <https://www.awwa.org/portals/0/files/publications/documents/toc/M32ed3.pdf>
11. Puust R., Kapelan Z., Savic D.A., Koppel T. A review of methods for leakage management in pipe. *Urban Water Journal*. 2010; 7(1):25-45. DOI: 10.1080/15730621003610878
12. Primin O.G., Gromov G.N., Ten A.E. Algorithms for constructing and calibrating electronic models of water supply system. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13:7(118):847-854. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.847-854
13. Annus I., Vassiljev A. Different approaches for calibration of an operational water distribution system containing old pipes. *Procedia Engineering*. 2015; 119:526-534. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.900
14. Sophocleousa S., Savica D., Kapelan Z., Shen Y., Sage P. A graph-based analytical technique for the improvement of water network model calibration. *Procedia Engineering*. 2016; 154:27-35. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.415
15. Primin O.G., Gromov G.N., Stepanov D.L., Kozlova O.V. Calibration of the electronic model of the water supply system (for example, the water supply network of the city of Salavat). *Water Supply and Sanitary Engineering*. 2018; 9:4-12. (rus.).
16. Wu Z.Y., Wang Q/, Butala S., Mi T. Darwin optimization framework user manual. Watertown, CT06795: Bentley Systems, Incorporated, 2011; 28-37.
17. Gromov G.N., Primin O.G. Use of genetic algorithms for calibration of hydraulic models of water supply systems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456:012108. DOI:10.1088/1757-899X/456/1/012108
18. Koppel T., Vassiljev A. Calibration of a model of an operational water distribution system containing pipes of different age. *Advances in Engineering Software*. 2009; 40(8):659-664. DOI: 10.1016/j.advensoft.2008.11.015
19. Koppel T., Vassiljev A. Use of modelling error dynamics for the calibration of water distribution systems. *Advances in Engineering Software*. 2012; 45(1):188-196. DOI: 10.1016/j.advensoft.2011.09.024
20. Zimoch I., Bartkiewicz E. Process of hydraulic models calibration. *E3S Web of Conferences*. 2018; 59:00007. DOI: 10.1051/e3sconf/20185900007

Received November March 5, 2021.

Adopted in revised form on May 13, 2021.

Approved for publication on May 13, 2021.

**BIONOTES: Grigory N. Gromov** — lecturer of the Department of Water-Supply Engineering and Sewage Disposal; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; head of Research and innovation department; **MosvodokanalNIprojekt JSC**; 22 Pleteshkovsky per., Moscow, 105005, Russian Federation; ID RISC: 868365; Scopus: 56991330600; gromovgn@mgsu.ru;

**Darya D. Khudyakova** — graduate student of the Department of Water-Supply Engineering and Sewage Disposal; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; lead engineer of Research and innovation Department; **MosvodokanalNIprojekt JSC**; 22 Pleteshkovsky per., Moscow, 105005, Russian Federation; ID RISC: 1068538; darya.khudyakova.94@mail.ru;

**Kirill G. Pyankov** — engineer of the 2 category of Research and innovation Department; **MosvodokanalNIprojekt JSC**; 22 Pleteshkovsky per., Moscow, 105005, Russian Federation; x9017012728@yandex.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 литературы.

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:

**И.О. Фамилия<sup>1</sup>, И.О. Фамилия<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна

<sup>2</sup> Место работы второго автора; город, страна

## 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 ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы 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 литературы. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список литературы 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 литературы и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках литературы, 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.

## 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 литературы рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями).

ми), 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 ЛИТЕРАТУРЫ

**Список литературы на русском языке** оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

### **Образец:**

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

**Список литературы на английском языке (reference)** оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

### **Образец:**

#### **Reference**

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

### **Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:**

**Книги до трех авторов:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель\*, Год издания; Общее количество страниц.

**Образец:**

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

**Книги более трех авторов:** Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

**Статья в печатном журнале:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том\* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

**Образец:**

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

**Статья в электронном журнале:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том\* (Выпуск): Страницы. URL.

**Образец:**

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: [http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03\\_03\\_2017.pdf](http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf) DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

**Статья, размещенная на интернет-сайте:** Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)\*. Название [Internet]. Город, Издатель\*, Год издания [Дата последнего обновления\*; дата цитирования]. URL

**Образец:** *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

\* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка литературы редакция рекомендует использовать ресурс [Citethisforme.com](http://Citethisforme.com).

# ШАБЛОН СТАТЬИ

УДК 11111

## ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

**И.О. Фамилия<sup>1</sup>, И.О. Фамилия<sup>2</sup>...**

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна

<sup>2</sup> Место работы первого автора; город, страна

**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.

## ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

**И.О. Фамилия<sup>1</sup>, И.О. Фамилия<sup>2</sup>...** на английском языке

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

<sup>2</sup> Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

**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.

### ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется

представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

**Литературный обзор.** Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, 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.

## ЛИТЕРАТУРА (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:**

## ЛИТЕРАТУРА

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

## REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Оформляются на русском и английском языках.**

**Об авторах:** **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

**Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

*Сведения об авторах* на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

**Віonotes:** **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

**Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

**ВНИМАНИЕ!** Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.



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 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 2021 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика \_\_\_\_\_

Адрес

плательщика \_\_\_\_\_

Сумма

платы

за

Сумма платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп.

Итого \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп. « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика \_\_\_\_\_

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 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 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 2021 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика \_\_\_\_\_

Адрес

плательщика \_\_\_\_\_

Сумма

платы

за

Сумма платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп.

Итого \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп. « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика \_\_\_\_\_

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

**ВНИМАНИЕ!**

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: [podpiska@mgsu.ru](mailto:podpiska@mgsu.ru).

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), [podpiska@mgsu.ru](mailto:podpiska@mgsu.ru).

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

