

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

# ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал  
по строительству и архитектуре

Том 17 Выпуск 1/2022  
Vol. 17 Issue 1/2022

# VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction  
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1

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

# ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 17. Выпуск 1  
2022**

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

Сквозной номер 158

# VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 17. Issue 1  
2022**

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

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

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

## Тематические рубрики

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

<b>Наименование органа, зарегистрировавшего издание:</b>	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
<b>ISSN</b>	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
<b>Периодичность:</b>	12 раз в год
<b>Учредители:</b>	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
<b>Выходит при научно-информационной поддержке:</b>	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
<b>Издатель:</b>	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: <a href="http://www.mgsu.ru">www.mgsu.ru</a> E-mail: <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>
<b>Типография:</b>	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
<b>Сайт журнала:</b>	<a href="http://vestnikmgsu.ru">http://vestnikmgsu.ru</a>
<b>E-mail:</b>	<a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>
<b>Тел.:</b>	(495) 287-49-14, доб. 23-93
<b>Подписка и распространение:</b>	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
<b>Подписан в печать</b>	26.01.2022.
<b>Подписан в свет</b>	28.01.2022.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 14,32. Тираж 100 экз. Заказ № 48

## 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

**Корректор:** Любовь Владимировна Светличная

**Дизайн и верстка:** Алина Германовна Алейникова

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

Журнал включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук. Индексируется в РИНЦ, Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка», UlrichsWeb Global Serials Directory, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, RSCI (Russian Science Citation Index на платформе Web of Science), ResearchBib

## Председатель редакционного совета

*Александр Романович Туснин*, д-р техн. наук., доц., 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) 2304-6600 (Online)
<b>Publication Frequency:</b>	Monthly
<b>Founders:</b>	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company "ASV Publishing House", 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
<b>The Journal enjoys the academic and informational support provided by</b>	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
<b>Publisher:</b>	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: <a href="http://www.mgsu.ru">www.mgsu.ru</a> E-mail: <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>
<b>Printing House:</b>	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
<b>Website journal:</b>	<a href="http://vestnikmgsu.ru">http://vestnikmgsu.ru</a>
<b>E-mail:</b>	<a href="mailto:vestnikmgsu@mgsu.ru">vestnikmgsu@mgsu.ru</a> , <a href="mailto:journals@mgsu.ru">journals@mgsu.ru</a>
<b>Subscription:</b>	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
<b>Signed for printing:</b>	26.01.2022.

Distributed by subscription

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

## Editor-in-Chief

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

## Deputy Editor-in-Chief

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

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

## Editorial Board

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

**Piotr Banaszuk**, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

**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

*Ф.Т. Бадалова*

**Medieval Azerbaijan and the development of its visual media**

**(Особенности развития визуальных медиа в Азербайджане в Средние века) . . . . . 11**

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

*Б.Б. Лампси, С.С. Шилов, П.А. Хазов*

**Численное и физическое моделирование ветровых потоков на большепролетное покрытие . . . . . 21**

*П.А. Акимов, М.Л. Мозгалева*

**О вейвлет-реализации дискретно-континуального метода конечных элементов**

**на основе В-сплайнов для локального решения двумерной задачи теории упругости . . . . . 32**

## СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*А.В. Шаманина, А.М. Айзенштадт*

**Особенности определения удельной поверхности порошковых кварцсодержащих систем . . . . . 42**

*О.В. Винокурова, А.А. Баранова*

**Влияние пен различной кратности на формирование структуры**

**теплоизоляционного пенобетона . . . . . 50**

## БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

*Р.А. Горшков, И.А. Войлоков*

**Условия образования наледей на скатных крышах зданий с холодным чердаком . . . . . 60**

*В.В. Симонян, В.И. Волков*

**Создание опорной геодезической сети на оползневых склонах в виде замкнутых**

**полигонометрических четырехугольников . . . . . 72**

## ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

*Ю.А. Шелушин*

**Преобразование параметров исходного волнения при искажении масштаба**

**гидравлической модели . . . . . 83**

*С.В. Сольский, О.Н. Котлов, Ф.П. Собкалов*

**Обоснование выбора оптимального основания противодиффузионного контура**

**при рекультивации накопителей токсичных отходов . . . . . 93**

## ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

*О.А. Проодоус, Д.И. Шлычков, И.А. Абросимова*

**Обоснование необходимости проведения гидродинамической**

**очистки самотечных сетей водоотведения . . . . . 106**

**Требования к оформлению научной статьи . . . . . 115**

# CONTENTS

## ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

*Firuz T. Badalova*

**Medieval Azerbaijan and the development of its visual media . . . . . 11**

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

*Boris B. Lampsi, Sergey S. Shilov, Pavel A. Khazov*

**Numerical and physical modeling of wind loads on long-span shell structures . . . . . 21**

*Pavel A. Akimov, Marina L. Mozgaleva*

**B-spline wavelet discrete-continual finite element method for the local solution  
to the two-dimensional problem of the theory of elasticity . . . . . 32**

## CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

*Aleksandra V. Shamanina, Arcady M. Ayzenshtadt*

**Features of determining the specific surface area of powdered quartz-containing systems . . . . . 42**

*Ol'ga V. Vinokurova, Albina A. Baranova*

**The influence of foams, having different expansion ratios, on the structuring  
of thermal insulation foam concrete. . . . . 50**

## SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

*Rostislav A. Gorshkov, Ilya A. Voilokov*

**Conditions for the formation of ice dams on pitched roofs of buildings with cold attics . . . . . 60**

*Vladimir V. Simonyan, Victor V. Volkov*

**The establishment of a reference geodetic network made of closed polygonometric  
quadrangles and designated for landslide slopes . . . . . 72**

## HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

*Yuriy A. Shelushinin*

**Changes in the initial parameters of waves caused by distortions  
in the scale of a hydraulic model . . . . . 83**

*Stanislav V. Solsky, Oleg N. Kotlov, Fedor P. Sobkalov*

**Justification of the optimal base choice for the anti-filtration circuit during the reclamation  
of toxic waste storage facilities. . . . . 93**

## ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

*Oleg A. Prodous, Dmitriy I. Shlychkov, Ivanna A. Abrosimova*

**Justification of the need for the hydrodynamic cleaning of gravity water discharge networks . . . . . 106**

**Requirements for research paper design . . . . . 115**

## 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

RESEARCH PAPER / НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

UDC 7.033(479.24)

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.11-20

## Medieval Azerbaijan and the development of its visual media

**Firuza T. Badalova**

*Azerbaijan University of Architecture and Construction (AUAC); Baku, Azerbaijan*

### ABSTRACT

**Introduction.** One of the main features of medieval structures created by Azerbaijani architects and sculptors is the artistic form decorated with elegant designs. Monuments with ornaments are found on buildings that serve as information carriers of the epoch (cult and memorial buildings, baths, castles, palaces, bridges). Since the 11th–12th centuries, the placement of various ornaments on monuments has become an integral part of Azerbaijani art.

**Materials and methods.** The use of various types of ornaments has led to the emergence of new architectural schools.

**Results.** Monuments created by medieval architects: Ibrahim ibn Osman (Ganja Gate, 1063), Adjami Abubekr oglu Nakhchivani (Yusif ibn Kusayr mausoleum in Nakhchivan, 1162), Momuna Khatun (Mausoleum of Momuna Khatun, 1186), etc. highlighted by their visual representations. Brief information about the history and architecture of the monument is inscribed on the stone slabs (Sayyed Yahya Bakuvi mausoleum, Maiden Tower, decorative patterns on the portal of the eastern gate of the Shirvanshah complex, etc.). Beginning in the Middle Ages, emergence of Azerbaijani architectural schools began in Arran, Nakhchivan, Shirvano-Absheron and Tabriz schools. Unlike the Middle Ages, nowadays visual information is more widely used on roads, in parks, on crossroads.

**Conclusions.** The formation of the architectural environment in the 11th–12th centuries revealed the styles of Baku, Ganja, Nakhchivan, Gabala and Arran. The Middle Ages played elegant ornaments in the form of a rose, geometrical, plot, legendary, mixed, and stamped. It has been established that the model of the city, based on ancient historical and theoretical studies, can be improved. The increasing importance of information requires the use of architectural, artistic, and aesthetic elements. In the 21st century elegant ornaments with visual power remain relevant in the urban environment.

**KEYWORDS:** national ornaments, elements of visual communication, architecture, visual culture, signs, ancient, urban environment

**FOR CITATION:** *Badalova F.T.* Medieval Azerbaijan and the development of its visual media. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(1):11-20. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.11-20 (rus.).

*Corresponding author:* Firuza T. Badalova, f.badalova.84@mail.ru.

## Особенности развития визуальных медиа в Азербайджане в Средние века

**Фируза Тофиг кызы Бадалова**

*Азербайджанский архитектурно-строительный университет (ААСУ); г. Баку, Азербайджан*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Одной из главных особенностей средневековых сооружений, созданных азербайджанскими архитекторами и скульпторами, является художественная форма, украшенная изящными узорами. Памятники с орнаментами встречаются на зданиях, которые служат информационными носителями эпохи (культовые и мемориальные сооружения, бани, замки, дворцы, мосты). Начиная с XI–XII вв. размещение различных орнаментов на памятниках стало неотъемлемой частью азербайджанского искусства.

**Материалы и методы.** Использование различных видов орнаментов привело к появлению новых архитектурных школ.

**Результаты.** Памятники, созданные средневековыми архитекторами: Ибрагим ибн Осман (Гянджинские ворота, 1063), Аджами Абубекр оглу Нахчивани (мавзолей Юсифа ибн Кусейра в Нахичеване, 1162), Момуне хатун (мавзолей Момуне хатун, 1186) и др., выделялись своими визуальными образами. Краткая информация об истории и архитектуре памятников записана на найденных каменных досках (мавзолей Сейида Яхья Бакуви, Девичья башня, декоративные узоры на портале восточных ворот Ширваншахского комплекса и др.). Начиная со Средних веков зарождение азербайджанских архитектурных школ началось в Арранской, Нахичеванской, Ширвано-Апшеронской, Тебризской школах. В отличие от Средневековья, в наше время визуальная информация более широко применяется на дорогах, в парках, на перекрестках улиц.

**Выводы.** Формирование архитектурной среды в XI–XII вв. выявило стили Баку, Гянджи, Нахичеваня, Габалы и Аррана. Важную роль на памятниках в эпоху Средневековья играли изящные орнаменты в форме розы, геометрические, сюжетные, легендарные, смешанные и гербовые. Установлено, что модель города, основанная на результатах древних исторических и теоретических исследований, может быть улучшена. Постоянное повышение роли информации требует использования архитектурных, художественных и эстетических элементов. В XXI в. изящные орнаменты, обладающие визуальной силой, сохраняют свою актуальность в городской среде.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** национальные орнаменты, элементы визуальной коммуникации, архитектура, визуальная культура, знаки, древний, городская среда

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** *Бадалова Ф.Т. Medieval Azerbaijan and the development of its visual media // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 1. С.11–20. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.11-20*

Автор, ответственный за переписку: Фируза Тофиг кызы Бадалова, f.badalova.84@mail.ru.

**INTRODUCTION**

The principles and methods, used in the traditional architectural environment of Azerbaijan, improve the relevance of the artistic design of structural elements by drawing attention to visual media.

Starting from the Middle Ages, tribes have used a simpler method of communication. They created methods and means to warn about the coming danger. The smoke and fire torches were the alarm signalling methods transmitting information over a distance. They were the means necessary to safeguard the human life and household [1]. Firewood, the ting of a hand-bell and beacon lights were widely used as signals [2].

In the following periods, visual information was conventionally provided in the form of a brief information block. Although this approach could generate a positive result in art, its application has absolutely different results in architectural creativity [3].

Hence, perfect forms were replaced with visual means. New forms were applied in architecture, art, etc.

**MATERIALS AND METHODS**

Starting from the 11th–12th centuries, the Azerbaijani architectural environment and its information carriers belonged in several styles in the cities of Aran,

Tebriz, Naxçıvan, Şirvan, Abşeron Baku, Shamakhi, Ganja, Nakhchivan, Gabala and Aran [3].

The Aran school of architecture was the first one in the history of Azerbaijani architecture. Some researchers believe there were architectural monuments in the city of Barda in Azerbaijan, which was part of the Arab Caliphate. A caravanserai, a mosque and religious buildings, a bathroom and a market were built there.

A combination of typological features of ancient and Islamic traditions were embodied in the visual form of medieval Azerbaijani architecture [4]. When Islamic traditions strengthened and feudal states gained independence, the Aran school of architecture began to emerge. The Aran school of Architecture reached Barda, Ganja and later Beylagan and Shamkir regions. The unique features of the Aran architecture and such visually striking monuments as Ganja Gates-Ibrahim Ibn Osman (1063), Ganja earthquake (1139) and many other monuments taken to Georgia during the Mongol invasions of the 13th century were destroyed. The inscription on the fence of the mosque in the Turkish city of Amasya, which was mentioned in the sources in 1236–1246, states that the Azerbaijani artist Maxmud oğlu Moxammad left Azerbaijan and moved to Turkey after the Mongol occupation [5] (Fig. 1).

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 17. Выпуск 1, 2022  
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 17. Issue 1, 2022

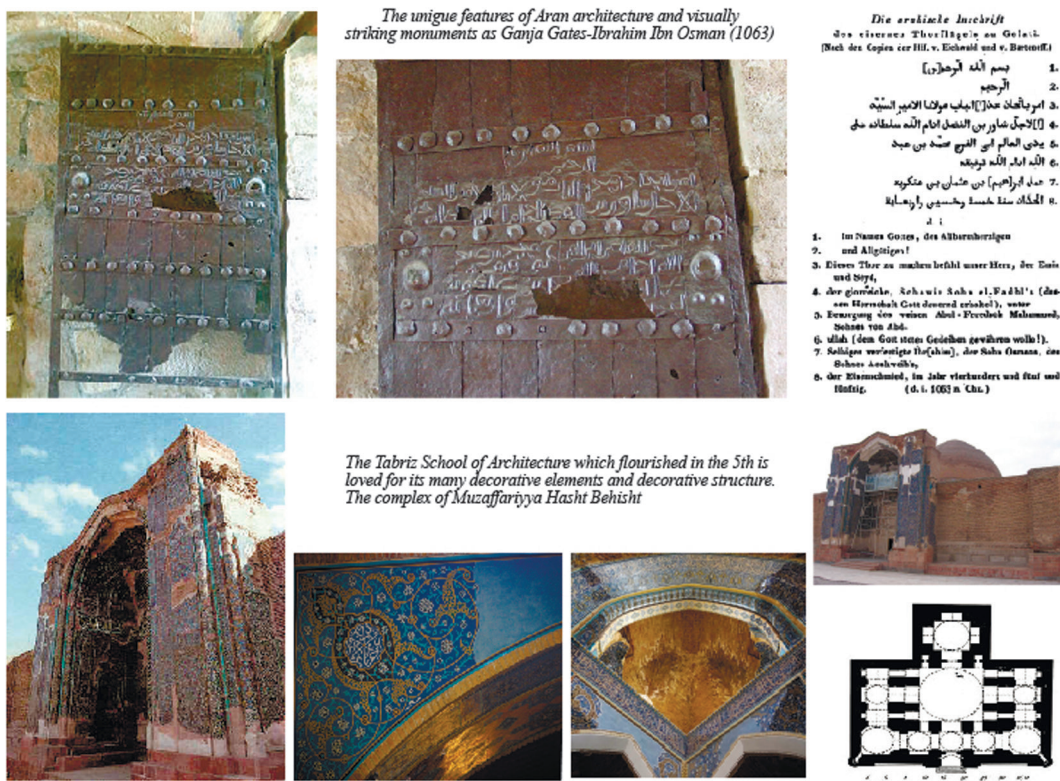


Fig. 1. The Aran school

Nakhchivan School of Architecture originates from Aran School of Architecture: they used the same construction materials, such as cobblestone and masonry, in particular, the patterned Ganja masonry. In the Shamkir region, white stone was added to this type of masonry to make it more attractive. Archaeological excavations in Beylagan give an idea of a building, baths, 3 bridges (12th century) over the Ganja River [6].

Nakhchivan-Maragha school of architecture dates back to the 11th century; it is widely spread in Azerbaijan. The Middle Ages defined the stylistic features of the Azerbaijani architecture. The buildings belonging in the Nakhchivan school of architecture are decorated with paints, tiles, and ornaments that make them overwhelmingly attractive. The visual elegance and dynamism of ornaments is typical for the Nakhchivan school of architecture. Its architectural masterpieces include the tomb of Yusif Ibn Kuseir oglu, architect Memar Adjemi Nakhchivani (12th century), the tomb of Barda — architect Ahmad Bin Ayyub al-Hafiz Albanayi a Nakhchivani (13th century), the tomb of Blue Gunbed in eastern Azerbaijan-Maragha (1194), the tomb of Red Gunbed (red dome), the architect Bakir Mohammad (1448), etc. [7]. The ornaments and inscriptions engraved on the monuments visually enliven the medieval period. The inscription on the tomb of Barda (1322) was studied in 1848 by famous orientalist Xanikov. The name Ahmad Bin Ayyub al-Hafiz Albanayi,

a Nakhchivani architect of this monument, is mentioned in the inscription<sup>1</sup> [1].

Nakhchivan School of Architecture is an extremely valuable piece of art that carries on its traditions: the visual image of the tomb is covered with a vertical “shirt” with a turquoise brick. Repetitive ornaments along the facade make the tomb attractive. In addition, Koran verses are inscribed in the middle strip of the tomb frieze. The inscription is made on the white background and it has a mosaic decor of a blue lion and plants [8] (Fig. 2).

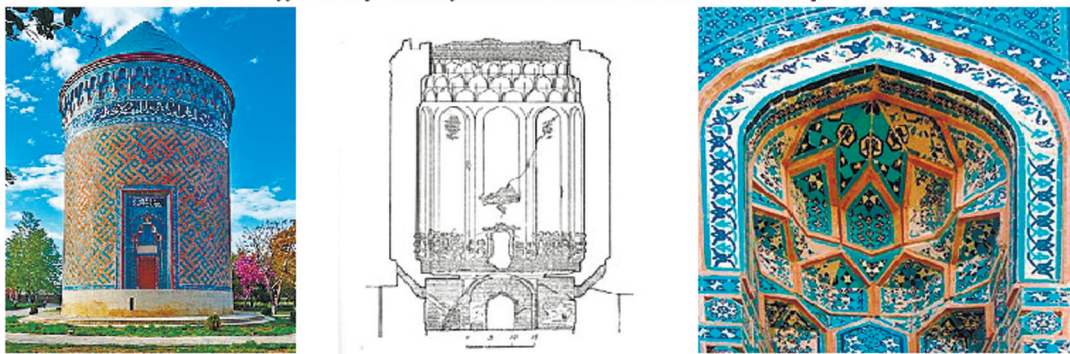
The palace and other interesting and valuable examples of the Azerbaijan architecture have appeared.

The Muzaffariyya architectural ensemble, that has a Juma mosque, a khanagah, a library, a madrasa, a tomb, and other buildings, is part of the monument rich in the visual information of the period [9]. The date of construction inscribed inside the main arch above the entrance to the ensemble (Hidjri — 870, Milad — 1465), Koran verses inscribed by calligrapher Neymatullah bin Mohammad al Bavvab are also mentioned [10]. The mosque is famous for its visual appearance. Engraved marbles, ceramic decor, mosaic-type decoration, white and turquoise patterns, and the facade were wonderful.

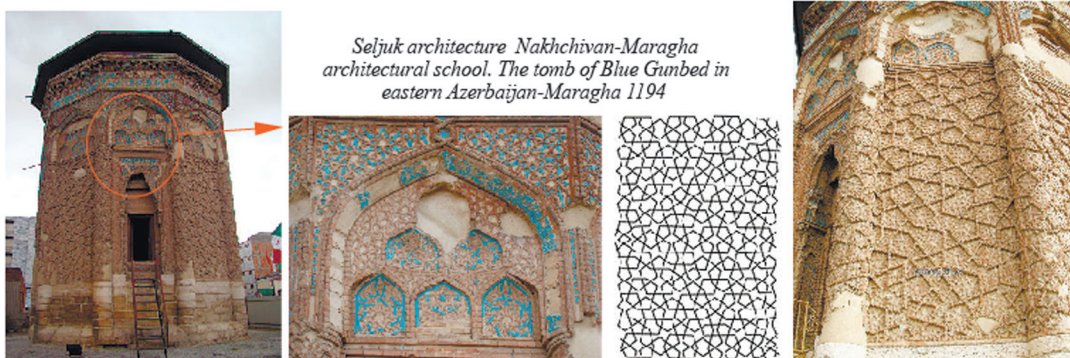
Over the history of the Azerbaijani architecture, the Shirvan-Absheron school of architecture has had stone-carved monuments rich in visual information.

<sup>1</sup> URL: <https://www.academia.edu/12625168/F.Q.M%C9%99mm%C9%99dov>

*Barda (1322) Nakhchivan School of Architecture. The name of architect of the monument Ahmad Bin Ayyub al Hafiz Albanayi an Nakhchivani is mentioned in the inscription.*



*Seljuk architecture Nakhchivan-Maragha architectural school. The tomb of Blue Gunbed in eastern Azerbaijan-Maragha 1194*



**Fig. 2.** Nakhchivan-Maragha school

As a result of archaeological excavations, architectural monuments and many pottery ornaments and household items belonging to the medieval city of Baku was discovered [11]. At the same time, Baku is located on the Caspian coast; it has a strong geographical position in terms of trade relations. The port was the main reason for the arrival of merchants from Central Asia and the Caucasus. It features the nicest-looking pieces like the Maiden Tower, the Shirvanshahs Palace, Icherishahar, etc.<sup>2</sup> [2]. The history has proven that the demand for the aesthetic improvement is growing in various districts of Baku, including Icherishahar. However, architectural masterpieces in all areas of the city have not yet been adequately presented. The environment cannot be reduced to architectural design, but it also has a wide range of psychological effects, we need to prove that it has a strong research and mathematical backgrounds [12] (Fig. 3).

Limestone was used to make the monuments conveying the city's antiquity. The Icherishahar castle has the status of a state architectural reserve. It was designed by architect Mohammad ibn Abu Bakr (1078–1079). The tower of Bibi Heybad Mosque (1305–1313) gives information about the existence of an astronomical

object [13]. The buttress of the Maiden Tower breaks the waves of the Caspian Sea and serves as the chronograph that indicates the historical age of the masonry and ancient carvings [14]. In addition, the name of the builder on the masonry indicates that monuments are carriers of visual information.

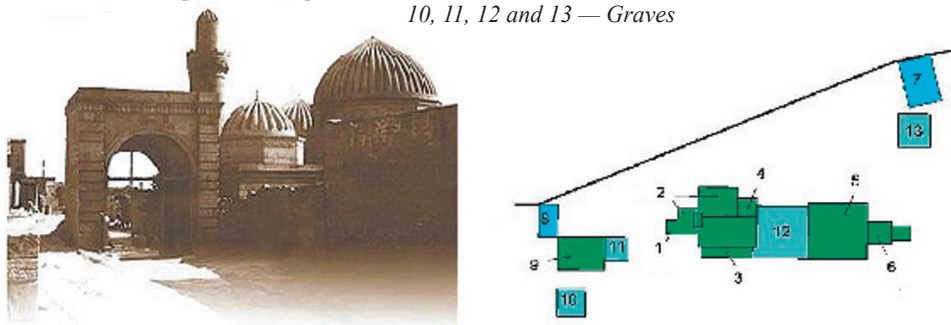
There are small buildings around the Maiden Tower that are regarded as a goldmine of information.

As the time progressed, inscriptions, such as multi-layered pictograms and graphic forms in historical images, became true art.

Information in the news and communication systems can be received and transmitted at the same time. Several methods were chosen to test this technique: the data were conventionally presented in a very small block of information [15]. If this approach could have had a positive effect on art, it would have manifested itself in an architectural work in a completely different way. Visual means allowed creating a perfect form scattered over the volume (over the structure of the form, over the architectural solution, over the artistic design, etc.). The information remained clear in the course of a few hundreds of years. In this case, the predominance was conveyed in graphic images in the news and media of the architectural age, while visual aids facilitated the creation of a captive form. At the same time, the environment manifests itself in the structure

<sup>2</sup> URL: [http://www.anl.az/down/meqale/respublika/2019/sentyabr/672903\(meqale\).pdf](http://www.anl.az/down/meqale/respublika/2019/sentyabr/672903(meqale).pdf)

*Plan of Bibiheybat mosque. Monuments in the plan in the picture Monuments shown in figures: 1 — Ancient mosque. 2 — Tomb. 3 — Arcade. 4 — Tower. 5 — New mosque. 6 — Output account. 7 — North Gate. 8 — South Gate. 9 — Service room. 10, 11, 12 and 13 — Graves*



*Baku Icherishahar architecture, the Maiden Tower of state history-architecture reserve (12th)*



Fig. 3. Shirvan-Absheron school

of the architectural solution of the volume and artistic design. Pieces of architecture serve as the means of communication focused on generating the cultural environment in terms of space: a constructive element or decorative elements conveying the artistic language of architecture [16].

The analysis proves that visual images that adorn pieces of medieval Azerbaijani architecture are not real images, but the product of human thinking. Architects who have benefited from different lifestyles contribute their ideas to the appearance of buildings. For example, the masonry of the Maiden Tower or the masonry of the Juma mosque has brief information engraved on the stones (the name of the master, the date of the building construction completion, etc.). From this point of view, the Icherisheher can be called a goldmine of information.

Information is conveyed by the way a piece of architecture is designed and structured (the Maiden Tower), as well as the way the elements of buildings are designed. For example, visual communication played an important role in the artistic arrangement of the environment. Some decorative elements are purely decorative [17].

Let's take Kufi inscriptions. They are displayed as letters written on stone. Hence, religion, literature, art, and architecture embody a unique structure that has not lost its value over the centuries (the tomb of Seyd Yahya Bakuvi, the Maiden Tower, decorative patterns on the portal of the eastern gate of the Shirvanshahs complex, etc.) [18].

If the clarity of information shared by medieval architectural monuments could remain unchanged over a few hundreds of years, the monument found itself in a completely different environment. The media boosted the development of architecture and the use of building materials, that were, in turn, contributed to the artistic design of an architectural solution. Since limestone and glazed brick are the most widely spread building materials in the territory of Azerbaijan, the architectural decor consisting of endless geometric elements was used here. However, mixed types of masonry were also available. For example, castles, defensive walls, mosques, khanagahs, madrasas, mausoleums and other items of architecture played the main role in the formation of the cultural environment.

The buildings were surrounded by simple though asymmetrical compositions that can be regarded as information media; they were more frequent in buildings belonging in the Shirvan-Absheron architecture [19].

The Shirvan-Absheron architecture, which is an important component of the Azerbaijani architecture, strengthened the Shirvanshah state (during the Kasrani dynasty) and set the stage for the flourishing and development of the local architecture.

The stylistic features of the Shirvan-Absheron architecture include compositions created by engraved stone ornaments. Ornaments that represented delicate lines on local stones boosted the artistic value of the monuments. Such ornaments were made

on the best visible parts of monuments. These inscriptions had names of builders, architects and craftsmen. They are legible even now [20]. From this point of view, Icherisheher can be called a goldmine of information.

## RESULTS OF THE RESEARCH

The Shirvanshahlar palace is a particularly rich source of visual evidence and inscriptions. At the same time, palace buildings have the names of sultans, emirs, chiefs, sheikhs, as well as the leaders of various religious organizations. Epigraphic inscriptions on the walls of the palace say that in the 13th–15th centuries the palace was ruled by such religious feudal organizations as “sedir” or “sedir muazzam”. The decorative patterns on the portal of the eastern gate of the palace facility demonstrate the local characteristics of historical architectural structures [21].

Thus, religion, literature, art, and architecture embody the culture of the people in the forms that convey the art of architecture, that has not lost its value over the centuries.

In M.S. Neymat's research, the word “sedir al muazzam” is preceded by the word “sedir al mohterem” and the nickname given to “sedir” means “an honorable person” [22].

Many Azerbaijani artists, architects and craftsmen use various artistic forms. These forms can be divided into six main groups: 1) Nebati; 2) geometric shapes; 3) subject drawings; 4) legends; 5) ornaments made of mixed inscriptions, and; 6) emblem-shaped images with symbolic meanings [23].

**Nebati** floral patterns were more widely used in the 15th–18th centuries. The artistic form was applied to the elements taken from the rich nature of Azerbaijan. Floral patterns were a combination of flowers, leaves, plants, and trees taken from the natural world [18]. These patterns can be seen in the Bulbul Mosque and the Shirvanshahlar palace (Fig. 4).

### Geometric patterns

The research has shown that the decoration patterns that increase the visual impact of monuments, have geometric shapes. Broken lines (3–6, 8, 12-angled) were widely used (Fig. 5).



Fig. 4. Nebati decoration in the architecture of Baku in the 19th century

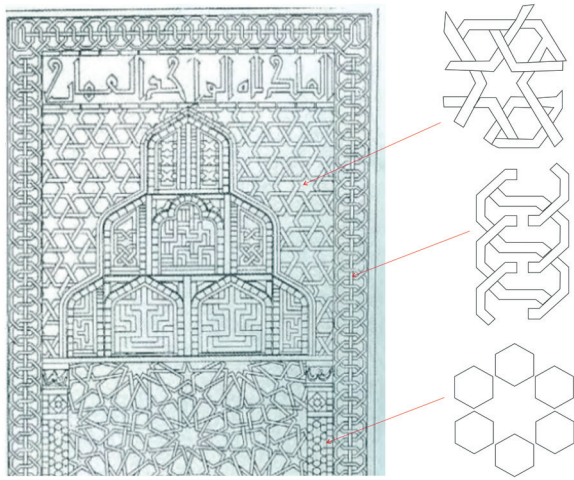


Fig. 5. Momine-Khatun mausoleum's geometric ornament (1186)

**Thematic painting**

These are the scenes of hunting and war. They depict acts of war, cold relations between the neighboring states, confrontations, and losses (Fig. 6).

**Legendary images**

Animals, birds, zoomorphic and mythical images are visually enlivened pieces of art. In the ancient times, these formal ornaments were predominant in religious ceremonies. However, in the middle ages, they were associated with folklore and included in fairy tales and legends. Nowadays bird images (peacocks and nightingales) are preserved as precious exhibits, decorating many architectural samples.

The images of horses and lions, which were popular among Turkish-speaking people, were more widely used in the 16th and 19th centuries. These eloquently depicted figures (a sphinx with a human-lion head), that date back to the 19th century, can be found in Baku, on the edge of a double gate under a balcony (Fig. 7).

**Ornaments composed of mixed inscriptions**

Along with different visual images, we also come across mixed writing. Prose, basil, toqi, ruqe, kufi were widely used in different periods. These inscriptions include verses, prayers, poems, and historical facts taken from the Koran, as well as the facts about the architect and the customer (Fig. 8).

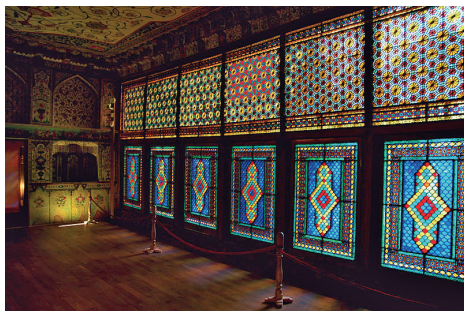


Fig. 6. The historic centre of Sheki and the Khan's Palace

**Emblems**

Emblems and symbols are placed next to decorative paintings on documents and monuments. Emblems and symbols have a subjective nature. We come across wooden paintings in the interiors of many buildings of the 19th century (trees, pomegranates,

flowers). At the same time, in the emblems depicting animals, different tribes were separated from each other throughout the history. The images of the ram facing the monument also look like an emblem (Fig. 9).

These images demonstrate the high informational capacity of architecture. In Baku, the palace of Shirvanshahs has inscriptions informing about political and military events, construction of the palace building carved on the stones of the Sebail Castle. I. Jafarzadeh, an old archaeologist who has been examining these stones for many years, proved that human and animal silhouettes have a strong sense. It is noteworthy that in addition to images of real creatures, drawn on the Bayil stones, mythical images, drawn there include gryphons (eagle heads, lion bodies), vaq-vaq (tree trunks, depictions of human heads on branches), sphinxes (female heads and lion bodies that have wings). Thus, the research confirms that the characters, depicted in the syncretic images, are taken from the sagas and legends of the ancient Turkish-speaking people [24].



Fig. 7. Syncretic drawings on the bronze belt that dates back to the first millennium. Khojaly Karabakh



Fig. 8. Samples of writing in the ensemble of the Divankhana and Baku Shirvanshahs Palace (the 15th century)



Fig. 9. The ram as an emblem. Zangilan district (1578)

All we can say about the middle ages is that as the collection of signs multiplied, they became more and more professional. Painters relied on their intuition and thinking.

Stereotypical methods were used to transform graphic information into visual information, which proves the existence of general patterns [25].

On the other hand, the fact that progress was reaching its climax ensured the emergence of multi-purpose signalling tools. Changes in architecture were conveyed in the desire for enlightenment.

## CONCLUSION AND DISCUSSION

The development of the architectural environment in the 11th and 12th centuries caused the development of the styles of Baku, Ganja, Nakhchivan, Gabala and Arran. Flower, geometric shapes, thematic painting, legendary and mixed images, coats of arms and fine ornaments played an important role in the monuments of the medieval period.

It should be noted that the visual images of the middle ages were a combination of attractive cultural, human, and national mindsets (Ateshgah temple built in Surakhani village in the 18th century, Divankhana located in the northern part of Shirvan-

shah's Palace was built by Shirvanshah Khalilullah in the 15th century).

Regardless of the availability of information, a person can take advantage of the visual data in an outdoor urban environment.

The history of our natural culture, social, economic, intellectual, creative and cultural ideas is very old. The spread of historical images should be brought to the fore over the years.

No matter how much information is available today, a person can adapt it to his needs by using various equipment.

Presently, the replacement of visual images with virtual ones makes the transfer capacity of modern technologies relevant in society [26].

At present, buildings that have historical inscriptions are protected by our state.

As a result of the analysis, it was established that the city model, developed on the basis of the results of ancient historical and theoretical studies, can be improved. The permanently increasing role of information requires the use of architectural, artistic, and aesthetic elements.

Elegant decorative ornaments featuring visual power are relevant in the urban environment of the 21st century.

## REFERENCES

1. Amanzada R. *History of the architecture of Azerbaijan. The architecture of Azerbaijan in the 15th–19th centuries*. Baku, East-West Publ., 2013; 226. (rus.).
2. Sysoeva E.V. Tracking the origin of civil engineering as a science since ancient times. *Construction: Science and Education*. 2020; 10(1):1. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.1.1 (rus.).
3. Mammadova G.H., Mammadova Z.G. *History of the architecture of Azerbaijan. Architecture of the Middle Ages (8th–14th centuries)*. Baku, East-West Publ., 2013; 318. (rus.).
4. Akhundov D. *Architecture of ancient and early medieval Azerbaijan*. Baku, Azerbaijan State Publishing House, 1986; 173. (rus.).
5. Məmmədov F.Q. *Orta əsr Azərbaycan memarlıq məktəblərinin əlaqələri*. Bakı, Şərq-Qərb, 2013; 198 [Mammadov F.Q. *Connections of the medieval architectural schools of Azerbaijan*. Baku, East-West Publ., 2013; 198].
6. Amanzada R.B. *History of architecture of Azerbaijan. Architecture of Azerbaijan in the 15th–early 19th centuries. Vol.3*. Baku, East-West Publ., 2013; 224. (rus.).
7. Əliyeva R. *Azərbaycan memarlığının klassikləri. Memar Əcəmi Əbubəkr oğlu Naxçıvani*. Bakı, Şərq-Qərb, 2013; 76 [Aliyeva R. *Classics of Azerbaijani architecture. Architect Ajami Abubakr oğlu Nakhchivani*. Baku, East-West Publ., 2013; 76].
8. Əsgər Əhməd *XII–XV əsrlərdə Azərbaycanın mənəvi mədəniyyəti*. Bakı, Elm, 2012; 372 [Asker A. *Spiritual culture of Azerbaijan in the 12th–15th centuries*. Baku, Elm Publ., 2012; 372].
9. Əmən zadə R.B. *Azərbaycan memarlıq abidələrinin tipologiyası XI–XVII əsrlər*. Bakı, Xəzər Universitetinin nəşriyyatı, 2016; 144 [Amanzada R.B. *Typology of architectural monuments of Azerbaijan 11th–17th centuries*. Xazar University Press, Baku, 2016; 144].
10. Nurmamedov M.N. Problems of preservation of architectural and urban heritage of the historical village of Lahij in Azerbaijan. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(4):403–412. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.403-412 (rus.).
11. Nuriyeva I. *Azərbaycan tarixi (ən qədim zamanlardan XXI əsrin əvvəllərinədək)*. Bakı, Mütərcim, 2015; 338 [Nuriyeva I. *History of Azerbaijan (from ancient times to the beginning of the XXI century)*. Baku, Mutarjim, 2015; 338].
12. Əliyeva R.Ş., Badalov E.S. *Abşeronda məskunlaşma və memarlıq*. Bakı, Avropa Nəşriyyatı, 2016; 264 [Aliyeva R., Badalov E.S. *Settlement and architecture in Absheron*. Europe Publ., Baku, 2016; 264].
13. *Azərbaycan tarixi abidələri və toponimləri. Bibliografiya*. Bakı, Azərbaycan Milli Kitabxanası, 2016; 646 [Historical monuments and toponyms of Azerbaijan. Baku, Azerbaijan National Library, 2016; 646].
14. Ələkbərov A., Məmmədov V.R. *Tag, tağbənd və günbəzlərin yaranma tarixi və onların qurulması*. Bakı, Avropa Nəşriyyatı, 2018; 185 [Alakbarov A., Mammadov V.R. *History of creation of arches, tagbands and domes and their construction*. Europe Publ., Baku, 2018; 185].
15. Ahmad M., Rashid K., Naz N. Study of the Ornamentation of Bhong Mosque for the Survival of Decorative Patterns in Islamic Architecture. *Frontiers of Architectural Research*. 2018; 7(2). DOI: 10.1016/j.foar.2018.03.004
16. Elgohary A. New ornaments' influence on the character of modern cities. *Cities' Identity Through Architecture and Arts*. 2018; 421–430. DOI: 10.1201/9781315166551-41
17. Qilman İlkin. *Köhnə Bakını tanıyırsanmı*. Bakı, Şirvannəşr, 2004; 42 [Gilman İlkin. *Do you know old Baku*. Baku, Shirvannashr, 2004; 42].
18. Ferreras-Cid E., Rosero-Anazco V. Compact City, Sprawled City. Language and Manipulation in Commercial Architectural Graphic Communication. *Estoa-Revista De La Facultad De Arquitectura Y Urbanismo De La Universidad De Cuenca*. 2019; 8(16):31–53.
19. Əfəndi R., Əfəndi T. *Azərbaycan bəzək sənəti*. Bakı, 2012; 82. [Efendi R., Efendi T. *Azerbaijan decoration*. Baku, 2012; 82].
20. Əmən zadə R.B. *Azərbaycan memarlığında baştağlar*. Bakı, Azərnəşr, 1995; 79 [Amanzada R.B. *Bashtaki in Azerbaijani architecture*. Azernashr, Baku, 1995; 79].
21. Əfəndi R. *Azərbaycan dekorativ sənəti (XI–XVIII yüzilliklər)*. Bakı, Elm, 1999; 172. [Efendi R. *Azerbaijani decorative and applied art (11th–18th centuries)*. Elm Publ., Baku, 1999; 172].
22. Ganbari A. Investigation of the connection between energy consumption and urban development in Iran using the “ARDL” method. *Journal of Energy Economics Studies*. 2012; 9(35):101–119.
23. Qurbanov A. *Damğalar, rəmzlər, ...mənim-səmələr*. Bakı, SILVER LLC, 2013; 327 [Qurbanov A. *Stamps, symbols... misappropriations*. SILVER LLC, Baku, 2013; 327].
24. Houpin S. *Urban mobility and sustainable development in the Mediterranean: Regional diagnostic Outlook*. France, Plan Bleu, 2010.
25. Gottdiener M., Budd L. *Key Concepts in Urban Studies*. SAGE Publications Ltd., 2005.
26. Suarez F. Towards Experiential Representation in Architecture. *Journal of Architecture and Urbanism*. 2016; 40(1):47–58.

Received October 21, 2021.

Adopted in revised form on December 28, 2021.

Approved for publication on December 29, 2021.

BIODOTES: **Firuza T. Badalova** — doctoral student, lecturer of the Department of Design; **Azerbaijan University of Architecture and Construction (AUAC)**; 11 Ayna Sultanova st., Baku, AZ-1073, Azerbaijan; ORCID: 0000-0001-6653-6017; f.badalova.84@mail.ru.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Аманзаде Р.* История архитектуры Азербайджана. Архитектура Азербайджана 15–19 веков. Баку : Восток-Запад, 2013. С. 226.
2. *Сысоева Е.В.* Истоки зарождения строительной науки с древних времен // Строительство: наука и образование. 2020. № 10 (1). С. 1–20. DOI: 10.22227/2305-5502.2020.1.1
3. *Мамедова Г.Г., Мамедова З.Г.* История архитектуры Азербайджана. Архитектура Средних веков (8–14 века). Баку : Восток-Запад, 2013. С. 318.
4. *Ахундов Д.А.* Архитектура древнего и раннесредневекового Азербайджана. Баку : Азербайджанское Государственное издательство, 1986. С. 173.
5. *Мəттəдов Ф.О.* Orta əsr Azərbaycan memarlıq məktəblərinin əlaqələri. Bakı, Şərq-Qərb, 2013; 198 (*Мамедов Ф.Г.* Связи средневековых архитектурных школ Азербайджана. Баку : Восток-Запад, 2013. С. 196).
6. *Аманзаде Р.* История архитектуры Азербайджана. Архитектура Азербайджана в XV – начале XIX веков. Т. III. Баку : Восток-Запад, 2013. С. 224.
7. *Əliyeva R.* Azərbaycan memarlığının klassikləri. Memar Əsəmi Əbubəkr oğlu Naxçıvani. Bakı, Şərq-Qərb, 2013; 76 (*Алиева Р.* Классики Азербайджанской архитектуры. Архитектор Аджамы Абу-бакр оглы Нахчывани. Баку : Восток-Запад, 2013. С. 76).
8. *Əsgər Əhməd XII–XV əsrlərdə Azərbaycanın mənəvi mədəniyyəti.* Bakı, Elm, 2012; 372 (*Аскер А.* Духовная культура Азербайджана в XII–XV веках. Баку : Элм, 2012. С. 372).
9. *Ətənzadə R.B.* Azərbaycan memarlıq abidələrinin tipologiyası XI–XVII əsrlər. Bakı, Xəzər Universitetinin nəşriyyatı, 2016; 144 (*Амензаде Р.* Типология архитектурных памятников Азербайджана XI–XVII вв. Баку : Издательство Университета Хазар, 2016. С. 144).
10. *Нурмамедов М.Н.* Проблемы сохранения архитектурно-градостроительного наследия исторического поселка Лагич в Азербайджане // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 4. С. 403–412. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.4.403-412
11. *Nuriyeva I.* Azərbaycan tarixi (ən qədim zamanlardan XXI əsrin əvvələrinədək). Bakı, Mütərcim, 2015; 338 (*Нуриева И.* История Азербайджана (с древнейших времен до начала XXI века). Баку : Мутарджим, 2015. С. 338).
12. *Əliyeva R.Ş., Badalov E.S.* Abşeronla məskunlaşma və memarlıq. Bakı, Avropa Nəşriyyatı, 2016; 264 (*Алиева Р.Ш., Бадалов Э.С.* Поселения и архитектура на Абшероне. Баку : Европа, 2016. С. 264).
13. Исторические памятники и топонимы Азербайджана. Баку : Национальная библиотека Азербайджана, 2016. С. 646.
14. *Ələkbərov A., Məmmədov V.R.* Tağ, tağbənd və günbəzlərin yaranma tarixi və onların qurulması. Bakı, Avropa Nəşriyyatı, 2018; 185 (*Алекперов А.А., Мамедов В.Р.* История создания тагов, тагбендов и куполов и их построение. Баку : Европа, 2018. С. 185).
15. *Ahmad M., Rashid K., Naz N.* Study of the Ornamentation of Bhong Mosque for the Survival of Decorative Patterns in Islamic Architecture // Frontiers of Architectural Research. 2018. Vol. 7. Issue 2. DOI: 10.1016/j.foar.2018.03.004
16. *Elgohary A.* New ornaments' influence on the character of modern cities // Cities' Identity Through Architecture and Arts. 2018. Pp. 421–430. DOI: 10.1201/9781315166551-41
17. *Гусейнзаде Б.* Ичеришехер (Коллекция фотографий 19–20 веков). Управление Государственного историко-архитектурного заповедника «Ичеришехер», Бакинский дом фотографии, 2018.
18. *Ferreras-Cid E., Rosero-Anazco V.* Compact City, Sprawled City. Language and Manipulation in Commercial Architectural Graphic Communication // Estoa-Revista De La Facultad De Arquitectura Y Urbanismo De La Universidad De Cuenca. 2019. Vol. 8. Issue 16. Pp. 31–53.
19. *Əfəndi R., Əfəndi T.* Azərbaycan bəzək sənəti. Bakı, 2012; 82 (*Эфенди Р., Эфенди Т.* Азербайджанское декоративное искусство. Баку, 2012. С. 82).
20. *Ətənzadə R.B.* Azərbaycan memarlığında baştağlar. Bakı, Azərnəşr, 1995; 79 (*Амензаде Р.Б.* Баштаки в Азербайджанской архитектуре. Баку : Азернашр, 1995. С. 79).
21. *Əfəndi R.* Azərbaycan dekorativ sənəti (XI–XVIII yüzilliklər). Bakı, Elm, 1999; 172 (*Эфенди Р.* Азербайджанское декоративно-прикладное искусство (XI–XVIII вв.). Баку : Элм, 1999. С. 172).
22. *Ganbari A.* Investigation of the connection between energy consumption and urban development in Iran using the “ARDL” method // Journal of Energy Economics Studies. 2012. Vol. 9. Issue 35. Pp. 101–119.
23. *Qurbanov A.* Damğalar, rənglər, ...mənim səmərə. Bakı, SILVER LLC, 2013; 327 (*Гурба-*

нов А. Штампы, символы... ассимиляции. Баку : Силвер, 2013. С. 327).

24. *Houpin S.* Urban mobility and sustainable development in the Mediterranean: Regional diagnostic Outlook. France : Plan Bleu, 2010.

25. *Gottdiener M., Budd L.* Key Concepts in Urban Studies. SAGE Publications Ltd, 2005.

26. *Suarez F.* Towards Experiential Representation in Architecture // Journal of Architecture and Urbanism. 2016. Vol. 40. Issue 1. Pp. 47–58.

*Поступила в редакцию 21 октября 2021 г.*

*Принята в доработанном виде 28 декабря 2021 г.*

*Одобрена для публикации 29 декабря 2021 г.*

**ОБ АВТОРЕ:** **Фируза Тофиг кызы Бадалова** — докторант, преподаватель кафедры дизайна; **Азербайджанский архитектурно-строительный университет (ААСУ)**; AZ-1073, Азербайджан, г. Баку, ул. Айны Султановой, д. 11; ORCID: 0000-0001-6653-6017; f.badalova.84@mail.ru.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.042.41

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.21-31

## Численное и физическое моделирование ветровых потоков на большепролетное покрытие

Борис Борисович Лампси<sup>1</sup>, Сергей Сергеевич Шилов<sup>1,2</sup>,  
Павел Алексеевич Хазов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ); г. Нижний Новгород, Россия;

<sup>2</sup> Строй-Снаб; г. Нижний Новгород, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Ветровая нагрузка способна оказывать существенное влияние на работу несущих конструкций целого ряда зданий и сооружений. При возведении большепролетных конструкций требования по второму предельному состоянию играют важную роль. Учет распределения ветровых воздействий по поверхности объекта в ряде случаев является трудной задачей. Цель исследования — определение распределения ветрового давления по покрытию большепролетного сооружения физическим и численным методами, а также сравнение и анализ полученных результатов.

**Материалы и методы.** Осуществлены физические испытания макета покрытия сооружения в аэродинамической трубе. Макет изготавливался из полимерных материалов с применением технологии 3D-печати. Рассмотрен порядок проведения натурных испытаний в аэродинамической трубе. Выполнено численное моделирование в различных программно-вычислительных комплексах (ПВК), таких как ANSYS CFX, SOLIDWORKS.

**Результаты.** Приведены результаты физических испытаний в аэродинамической трубе, таблицы с полученными значениями аэродинамических коэффициентов и ветрового давления, на основании которых построены цветовые изополя давлений. Показаны результаты итерационных расчетов численного моделирования в различных ПВК. Проанализированы распределения потоков ветра, так как объект исследования имеет характерную черту, а именно открытое покрытие, что позволяет воздушному потоку влиять на конструкции покрытия снизу, создавая дополнительные давления напора или отсоса.

**Выводы.** Выявлена благоприятная сходимости результатов физических испытаний и численного моделирования в ANSYS CFX, в других программных комплексах была получена неувязка с натурными исследованиями. При проектировании зданий и сооружений сложной геометрической формы следует проводить как физическое, так и численное моделирование.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** аэродинамическая труба, физические испытания, численное моделирование, ветровое давление потока воздуха

**Благодарности.** Данная работа выполнена при поддержке Научно-образовательного центра Нижегородской области «Техноплатформа 2035» в рамках соглашения № 16-11-2021/55 от 16.11.2021 г.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Лампси Б.Б., Шилов С.С., Хазов П.А. Численное и физическое моделирование ветровых потоков на большепролетное покрытие // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 1. С. 21–31. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.21-31

Автор, ответственный за переписку: Сергей Сергеевич Шилов, sergey.shilov.1997@mail.ru.

## Numerical and physical modeling of wind loads on long-span shell structures

Boris B. Lampsi<sup>1</sup>, Sergey S. Shilov<sup>1,2</sup>, Pavel A. Khazov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU);  
Nizhny Novgorod, Russian Federation;

<sup>2</sup> Stroy-Snab; Nizhny Novgorod, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Wind load has a significant impact on buildings and structures. It triggers the evolution of the stress-strain state that causes various kinds of deformations. Requirements, applicable to the serviceability limit state, are important for the construction of long-span structures. In some cases, the analysis of the distribution of wind effects over the surface of

a construction facility may be a challenging task. The purpose of the study is to identify the pattern of the wind load distribution over the shell of a long-span structure using physical and numerical methods, compare and analyze the obtained results.

**Materials and methods.** In the course of the study, a model of the shell structure was tested in the wind tunnel in the course of the physical testing. The model was made of polymer materials using the 3D printing technology. In addition, the article addresses the procedure for conducting full-scale tests in a wind tunnel. Numerical modeling was performed using various software and numerical software packages, such as Ansys CFX, SOLIDWORKS.

**Results.** The article presents the results of physical tests conducted in a wind tunnel, demonstrates the tables that have the values of aerodynamic coefficients and wind pressures, on the basis of which colour pressure isofields are made. Also, the article presents the results of iterative calculations of numerical models made using various software and numerical software packages. In addition, wind flow distributions were analyzed, since the object of the study has such a characteristic feature as an open-air shell, which allows the air flow to reach the structure from below.

**Conclusions.** The authors analyzed the data obtained as a result of the research; the convergence between the results of physical tests and numerical modeling in Ansys CFX was identified, a great discrepancy between numerical and physical studies was identified as a result of the application of other software packages. When designing buildings and structures, having intricate geometric shape, both physical and numerical modeling should be conducted.

**KEYWORDS:** wind tunnel, physical tests, numerical simulation, wind pressure, air flow

*Acknowledgements:* This work was supported by the Technoplatfrom 2035 Scientific and Educational Centre, the Nizhny Novgorod Region, under Agreement No. 16-11-2021/55 of November 16, 2021.

**FOR CITATION:** Lampsi B.B., Shilov S.S., Khazov P.A. Numerical and physical modeling of wind loads on long-span shell structures. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(1):21-31. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.21-31 (rus.).

*Corresponding author:* Sergey S. Shilov, sergey.shilov.1997@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Аэродинамика — раздел механики, в котором изучаются законы движения воздуха и силы, возникающие на поверхности тел, относительно которых происходит его движение [1]. В процессе проектирования уникальных зданий и сооружений одной из ключевых задач является прогнозирование их взаимодействия с ветровыми потоками. Задача выявления аэродинамических нагрузок сводится к установлению коэффициентов аэродинамических сил, поскольку обтекание здания ветровыми потоками в основном осуществляется при таких значениях числа Рейнольдса, при которых значения коэффициентов давления принимаются постоянными.

Большинство вновь возводимых зданий имеет нестандартную форму, поэтому определение влияния ветра на объект — сложная задача, так как в действующих нормативных документах отсутствует информация по распределению аэродинамических коэффициентов по поверхности объекта проектирования. Эта проблематика изучается давно как отечественными, так и иностранными учеными [2–7].

В действующем СП<sup>1</sup> говорится о том, что аэродинамические коэффициенты для зданий повышенного уровня ответственности следует устанавливать на основе модельных испытаний сооружений в аэродинамических трубах или опубликованных данных. Кроме того, современные технологии позволяют определить аэродинамические коэффициенты и ветровое давление на основе численного моделирования при помощи различных программных комплексов. Несмотря на то, что проведен ряд исследова-

ований аэродинамики зданий и сооружений путем физического эксперимента в аэродинамической трубе [8–13], такой подход требует соблюдения многих нюансов: подобие числа Рейнольдса, шероховатость покрытия, линейный масштаб макета и др. Применение численного моделирования дает возможность решить эти проблемы и получить решения, которые больше приближены к реальности.

Основная задача настоящей статьи — сравнить результаты физического и численного моделирования сооружения для дальнейшего анализа полученных значений. Практическая значимость исследования заключается в том, что данные результаты можно принимать во внимание при проектировании зданий и сооружений, имеющих схожую геометрию покрытия.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования взят проект футбольного стадиона вместимостью 38 000 зрительских мест (рис. 1). Для проведения физического моделирования проекта был изготовлен макет сооружения с целью определения значений аэродинамических коэффициентов в специализированной



Рис. 1. Общий вид исследуемого объекта

Fig. 1. General view of the object under study

<sup>1</sup> СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. М.: Минстрой России, 2016. 80 с.

трубе. Для повышения качества и точности модели, а также сокращения сроков изготовления применена технология 3D-печати с использованием полимерных материалов (рис. 2). Масштаб макета составил 1:740, чтобы выполнить требования к линейному масштабу.

В процессе физических испытаний использована аэродинамическая труба, расположенная в лаборатории кафедры отопления и вентиляции на базе ННГАСУ. Принципиальная схема трубы представлена на рис. 3.

Эксперимент проводился при ветровом потоке, фронт которого направлен на длинную сторону стадиона. С помощью микроманометра определялись показатели, которые способствовали установлению таких аэродинамических коэффициентов, как отношение давления, измеренного в изучаемой точке  $p_{\text{пов}}$ , к динамическому давлению, создаваемому ветровым потоком на вертикальную плоскость  $p_0$ , по формуле:

$$c_e = \frac{p_{\text{пов}}}{p_0}.$$

Основной особенностью покрытия является то, что имеется свободный проход воздуха под покрытия сооружения, поэтому важно учесть ветровое давление как с внешней части поверхности, так и с внутренней. С этой целью результаты измерялись дважды: на нижней и верхней границах поверхности модели, а затем складывались с учетом знака. Схема исследуемых точек покрытия приведена на рис. 4.

По найденным значениям аэродинамических коэффициентов определялось ветровое давление по стандартным формулам действующих нормативных документов в конкретном ветровом районе (в данном исследовании использовался III ветровой район).

В настоящее время разработано большое число универсальных пакетов программ, реализующих CFD-технологии математического моделирования (Computational Fluid Dynamic — CFD) и позволя-

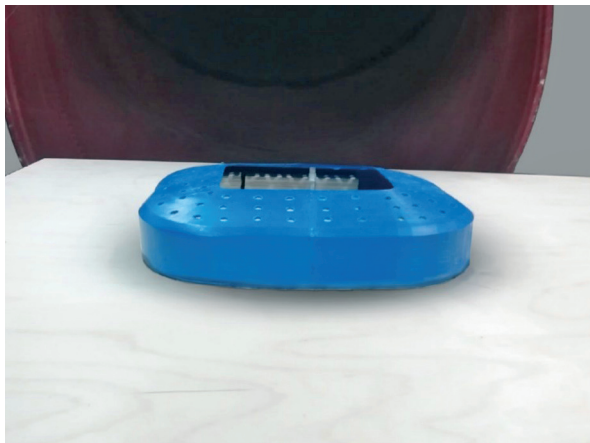


Рис. 2. Изготовленный макет для физических испытаний  
Fig. 2. The model made for the physical testing

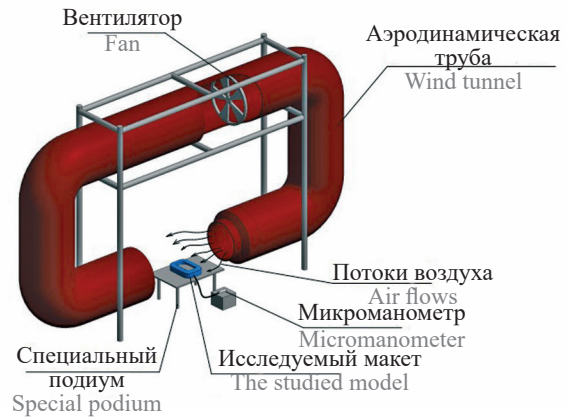


Рис. 3. Принципиальная схема аэродинамической трубы  
Fig. 3. Schematic diagram of a wind tunnel

ющих численно моделировать распределение ветровых потоков по поверхности сооружений сложной геометрической формы [14–21]. Численные методы исследования распределения давлений по поверхности покрытия основаны на решении уравнений Навье – Стокса, описывающего обтекание твердого тела потоком сжимаемой жидкости [22]. Кроме того, при моделировании ветровых потоков допускаются некоторые упрощения: потоки предполагаются несжимаемыми и изотермическими, массовые силы не учитываются. Принимая это во внимание, уравнения Навье – Стокса будут иметь вид:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j v_i)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad \text{— уравнение}$$

переноса;

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} \quad \text{— уравнение непрерывности;}$$

$$p = \text{const} \quad \text{— уравнение состояния,}$$

где  $v_i$  — компоненты вектора скорости (по осям  $x, y, z$ );  $p$  — давление;  $t$  — время;  $\rho$  — плотность;  $\mu = \text{const}$  — динамический коэффициент вязкости.

В данном исследовании численное моделирование выполнялось в двух программных комплексах: модуль в вычислительной гидрогазодинамике ANSYS CFX, процессор Flow Simulation программы SOLIDWORKS.

Размеры рабочего пространства были приняты в соответствии с работой [22] в зависимости от максимального размера объекта:  $A \geq 5H_{\text{max}}$ ,  $B \geq 5H_{\text{max}}$ ,  $C \geq 15H_{\text{max}}$ ,  $D \geq 6H_{\text{max}}$  (рис. 5). Построение расчетной схемы производилось в программе SpaceClaim среды ANSYS Workbench. С целью создания расчетной сетки конечных элементов применялся сеточный препроцессор ANSYS Meshing. Для корректного воспроизведения течения в настройках сеточного генератора задавалось сгущение элементов сетки к поверхности сооружения. Задавались граничные условия на входе и выходе воздуха из расчетной области. При назначении граничных условий необ-

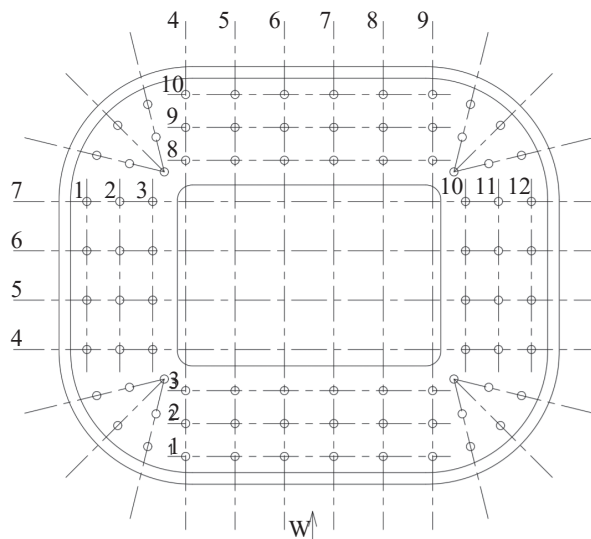


Рис. 4. Схема расположения исследуемых точек покрытия стадиона

Fig. 4. The diagram of the stadium shell points under study

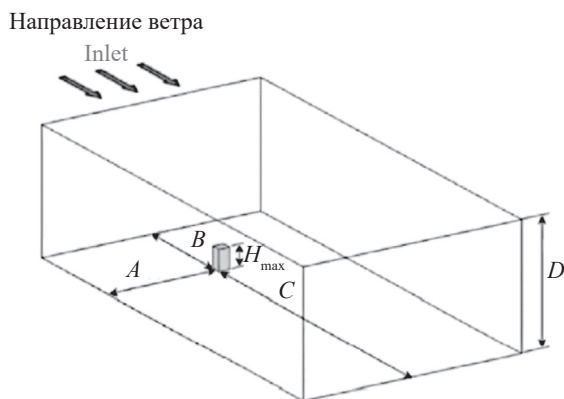


Рис. 5. Схема к определению параметров расчетной области

Fig. 5. The drawing used to determine the parameters of the computational domain

Табл. 1. Значения аэродинамических коэффициентов

Table 1. Values of aerodynamic coefficients

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	-	-0,11	-0,06	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,06	-0,11	-	-
2	-	-0,13	-0,11	-0,06	-0,06	-0,05	-0,05	-0,06	-0,06	-0,11	-0,13	-
3	-0,13	-0,03	-0,03	-0,11	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,11	-0,03	-0,03	-0,13
4	-0,03	-0,06	-0,06	-	-	-	-	-	-	-0,06	-0,06	-0,03
5	-0,06	-0,06	-0,03	-	-	-	-	-	-	-0,03	-0,06	-0,06
6	-0,13	-0,03	-0,03	-	-	-	-	-	-	-0,03	-0,03	-0,13
7	-0,06	-0,10	-0,11	-	-	-	-	-	-	-0,19	-0,10	-0,06
8	-0,13	-0,10	-0,13	-0,10	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,10	-0,13	-0,10	-0,13
9	-	-0,10	-0,10	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,05	-0,10	-0,10	-
10	-	-	-0,13	-0,13	-0,13	-0,06	-0,06	-0,13	-0,13	-0,13	-	-

ходимо, чтобы они не влияли на результаты определения аэродинамических характеристик вблизи поверхности здания:

- на входе в расчетную область задается скорость потока ( $V = 30,0$  м/с, которая была определена по известным формулам в зависимости от ветрового района);
- на выходе — условие постоянства давления (относительное давление равно 0 Па);
- на удаленных внешних боковых границах — условие аэродинамической гладкой сетки;
- на границе объекта исследования — условие прилипания (отсутствие скольжения).

В результате итерационного расчета были получены данные о распределении ветрового давления по поверхности здания и визуализации его обтекания воздушным потоком.

При численном моделировании в программно-вычислительном комплексе (ПК) SOLIDWORKS решалась внешняя задача по определению ветрового давления на покрытие сооружения. Размеры рабочей области назначались аналогично моделированию в ANSYS CFX. На входе задавалась скорость ветра, равная 30,0 м/с, а на выходе только значение атмосферного давления. В результате проводился итерационный расчет с целью получения необходимых данных.

Кроме того, для наглядного представления поведения ветровых потоков использовался программный комплекс SOLIDWORKS в процессоре Flow Simulations, который позволяет получить картину распределения ветрового потока на сооружение. С такой же целью был применен ПК ANSYS CFX.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наиболее трудо- и времязатратным является физическое моделирование макета сооружения, для которого определялись аэродинамические коэффициенты для каждой исследуемой точки, а за-

тем — ветровое давление. Полученные результаты для более наглядного представления сведены в табл. 1, 2.

На основании полученных значений были построены изополя распределения ветрового давления по покрытию сооружения (рис. 6).

Табл. 2. Значения ветрового давления

Table 2. Values of wind pressure

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	–	–	–0,13	–0,08	–0,06	–0,06	–0,06	–0,06	–0,08	–0,13	–	–
2	–	–0,15	–0,13	–0,08	–0,08	–0,06	–0,06	–0,08	–0,08	–0,13	–0,15	–
3	–0,15	–0,04	–0,04	–0,13	–0,08	–0,08	–0,08	–0,08	–0,13	–0,04	–0,04	–0,15
4	–0,04	–0,08	–0,08	–	–	–	–	–	–	–0,08	–0,08	–0,04
5	–0,08	–0,08	–0,04	–	–	–	–	–	–	–0,04	–0,08	–0,08
6	–0,15	–0,04	–0,04	–	–	–	–	–	–	–0,04	–0,04	–0,15
7	–0,08	–0,11	–0,13	–	–	–	–	–	–	–0,13	–0,11	–0,08
8	–0,15	–0,11	–0,15	–0,11	–0,06	–0,06	–0,06	–0,06	–0,11	–0,15	–0,11	–0,15
9	–	–0,11	–0,11	–0,06	–0,06	–0,06	–0,06	–0,08	–0,06	–0,11	–0,11	–
10	–	–	–0,15	–0,15	–0,15	–0,08	–0,08	–0,15	–0,15	–0,15	–	–

Примечание к табл. 1, 2: номера 1–12 и 1–10 показывают ряды расположения исследуемых точек; градиент выражает различную интенсивность давления в исследуемых точках.

Note to Tables 1, 2: numbers 1–12 and 1–10 show the rows of the points under study; the gradient shows the varying pressure intensity at the points of study.

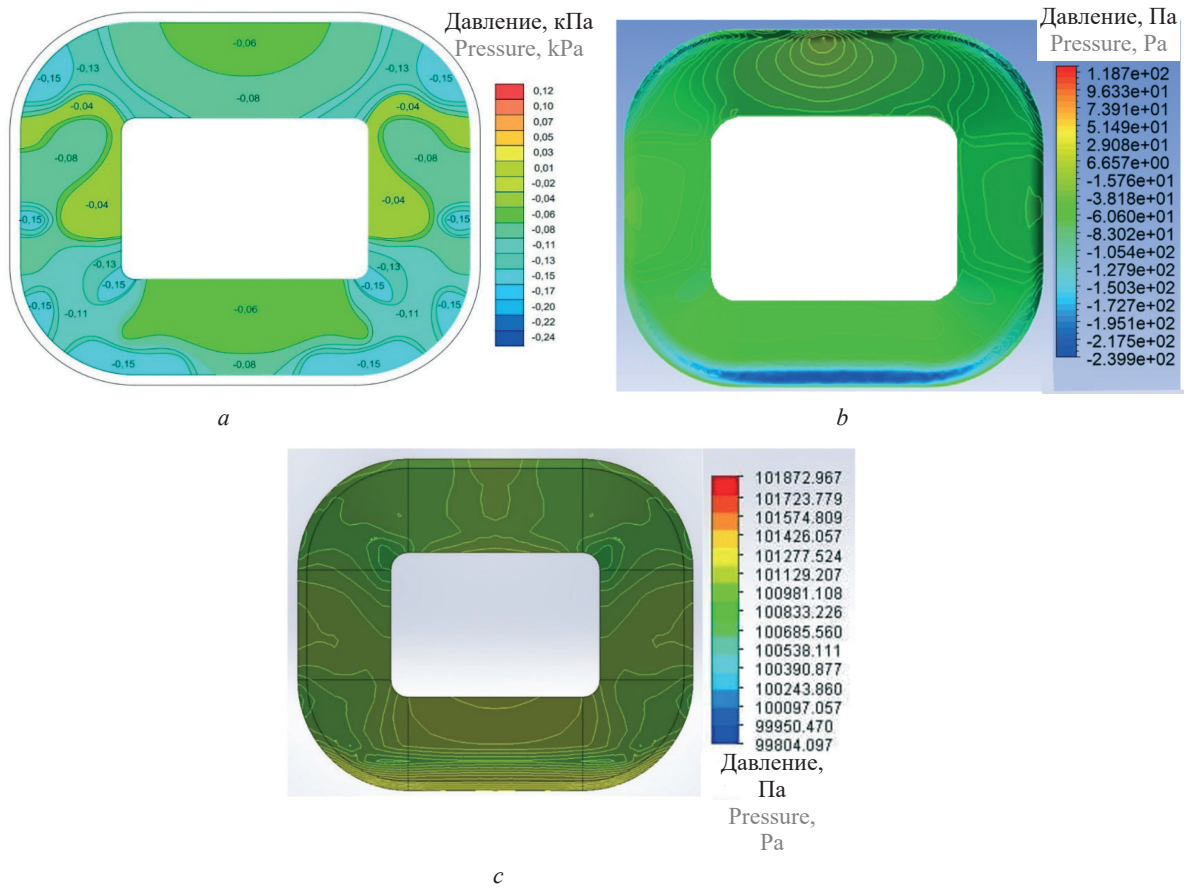


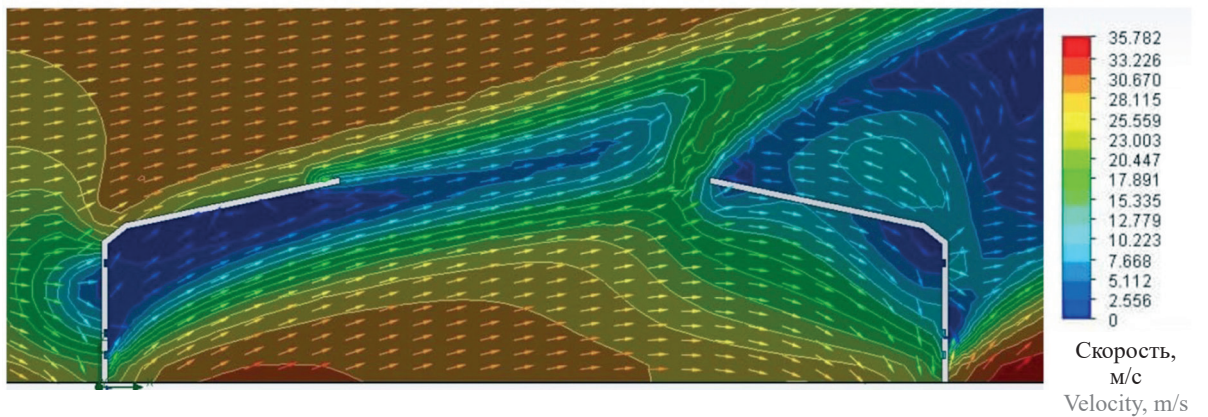
Рис. 6. Изополя ветрового давления, полученные в ходе физического моделирования (а) и численного моделирования в ПК ANSYS CFX (б); и в SOLIDWORKS (с)

Fig. 6. Isofields of wind pressures obtained during physical modeling (a) and during numerical modeling in ANSYS CFX (b); and SOLIDWORKS (c)

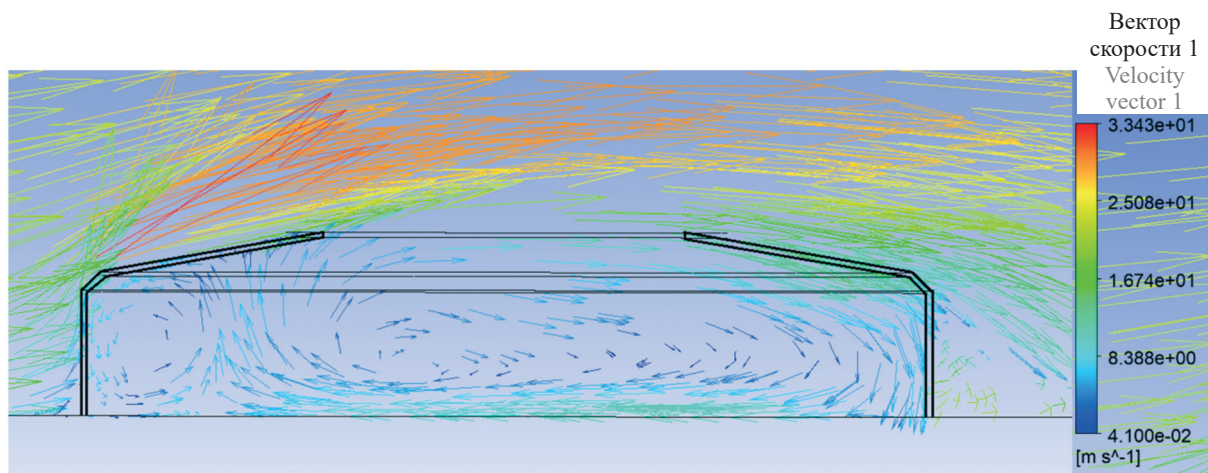
Табл. 3. Значения ветрового давления, полученные в программе SOLIDWORKS

Table 3. Values of wind pressures obtained in SOLIDWORKS software

Результат моделирования с учетом АД, Па The result of modeling with account taken of AP, Pa	Результат моделирования без учета АД, Па The result of modeling without the account of AP, Pa	Результат моделирования без учета АД, кПа The result of modeling without the account of AP, kPa
101 873	548,0	0,548
101 724	399,0	0,399
101 575	250,0	0,25
101 426	101,0	0,101
101 278	-47,0	-0,047
101 129	-196,0	-0,196
100 981	-344,0	-0,344
100 833	-492,0	-0,492
100 686	-639,0	-0,639
100 538	-787,0	-0,787
100 391	-934,0	-0,934
100 244	-1081,0	-1,081
100 097	-1228,0	-1,228
99 950	-1375,0	-1,375
99 804	-1521,0	-1,521



a



b

Рис. 7. Визуализация ветровых потоков в ПБК SOLIDWORKS (a) и ANSYS CFX (b)

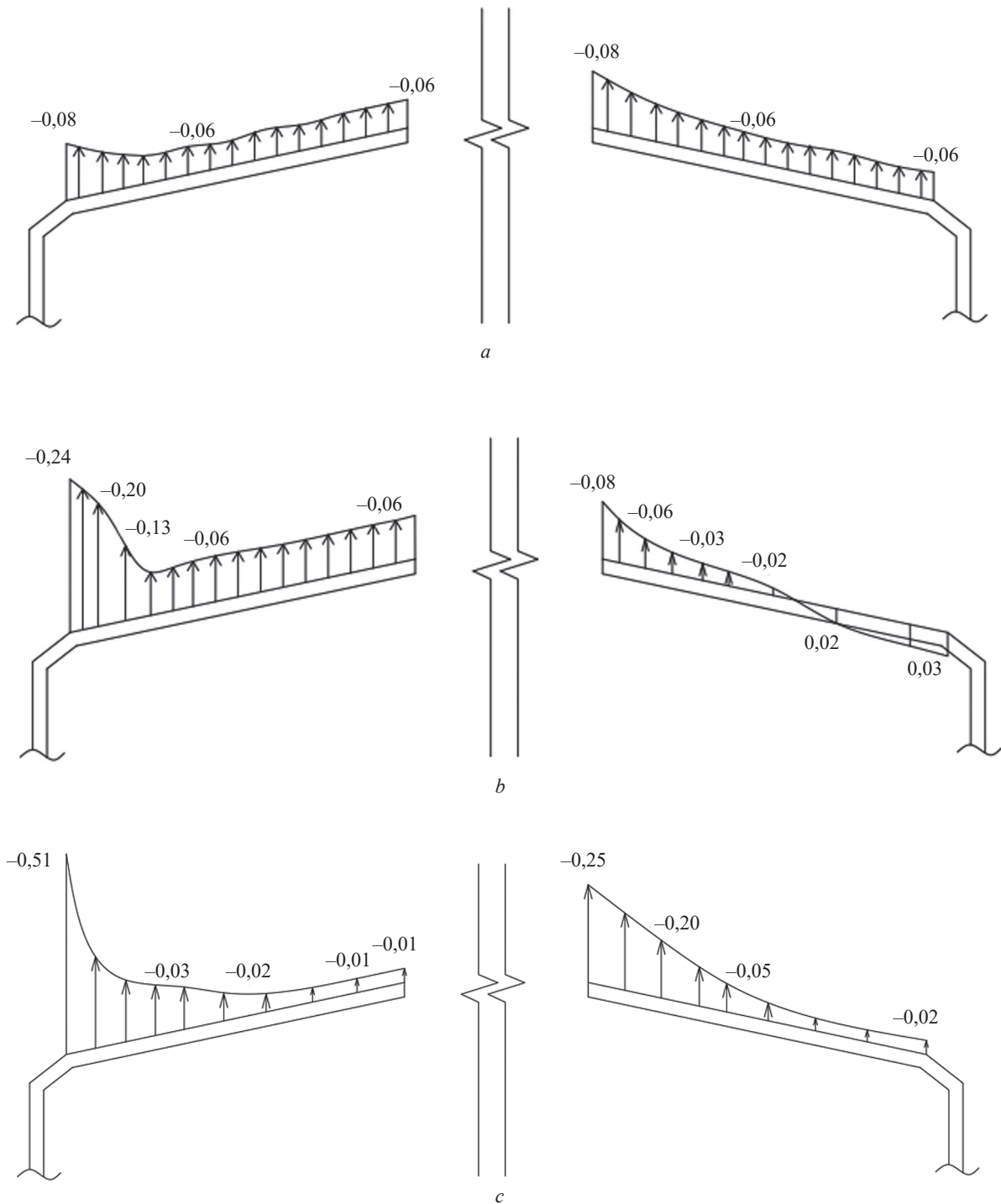
Fig. 7. Visualization of wind flows in SOLIDWORKS (a) and ANSYS CFX (b)

Изополя ветрового давления, полученные в ходе итерационных расчетов при приемлемой сходимости в ПК ANSYS CFX и в SOLIDWORKS, представлены на рис. 6. Следует отметить, что результаты в SOLIDWORKS показаны с учетом нормального атмосферного давления (АД) и для учета только давления, действующего на покрытие. Из найденного давления надо вычесть нормальное АД (101 325 Па). Результаты

сведены в табл. 3 для более объективного анализа.

На рис. 7 показана полученная в ПК SOLIDWORKS и ANSYS CFX визуализация ветровых потоков.

На основе результатов численного и физического моделирования построены эпюры ветрового давления по сечению, проведенному вдоль направления потока (рис. 8).



**Рис. 8.** Эпюры ветрового давления для физического эксперимента (a); ANSYS CFX (b) и ПК SOLIDWORKS (c)  
**Fig. 8.** Wind pressure curves for the physical experiment (a); ANSYS CFX (b) and SOLIDWORKS (c)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

Физическое моделирование показало, что на покрытие действует преимущественно отрицательное давление, что приводит к дополнительному разгрузению конструкций. Выявлены несколько участков срывов потока и увеличения ветрового давления. Величина ветрового давления преимущественно изменяется в пределах  $-0,25 \dots -0,04$  кПа.

По результатам численного моделирования в ANSYS CFX было определено, что на всем покрытии преимущественно происходит отсос, но также имеются зоны с положительным давлением. Выявлена зона, которая занимает большую часть покрытия с ветровым давлением около  $-0,06$  кПа. Ветровые давления изменяются в пределах  $-0,24 \dots +0,04$  кПа.

При численном моделировании в SOLIDWORKS установлены зоны как отрицательного, так и положительного давления. Диапазон давления составил  $0,51 \dots 0,10$  кПа.

По полученным схемам ветровых потоков можно определить, что потоки «заходят» под покрытие сооружения, а значит, создаются зоны, в которых возникает дополнительное давление (как отрицательное, так и положительное). При прохождении потоков над левой консолью они образуют под ней (см. рис. 7) зону пониженного давления, что приводит к дополнительному отсосу.

Анализ полученных значений показывает, что диапазоны ветрового давления для каждого вида исследования практически совпадают. Также можно выделить одинаковые участки при проведении натурных испытаний и численного моделирования в ANSYS CFX.

По эпюрам давления можно увидеть ряд отличий:

- при численном моделировании наблюдается увеличение давления на кромке покрытия, которое отсутствует при физическом моделировании (из-за малого размера макета проблематично измерить давление на кромке);

- в ПВК ANSYS CFX установлено возникновение положительного давления от действия ветровой нагрузки, отсутствующее в других видах исследований;

- в ПВК SOLIDWORKS отмечается резкое увеличение давления на кромках как левой, так и правой консольных частей.

На основании проведенных экспериментов и моделирования было установлено, что результаты, полученные в SOLIDWORKS, хоть и имеют некоторые совпадения по изополям давления, все-таки отличаются от других данных, полученных ранее, что при проектировании может привести к неправильному распределению зон ветра и некорректному учету асимметрии нагрузки, а следовательно, к ошибочному анализу напряженно-деформированного состояния. Имеются завышенные пиковые значения на кромках покрытия и заниженные, по сравнению с другими исследованиями, значения по большей части поверхности.

В общем можно сделать вывод о том, что при проведении физического эксперимента в аэродинамической трубе и численном моделировании в ANSYS CFX наблюдается высокая сходимость результатов как по характеру распределения ветрового давления, так и в численном эквиваленте. Таким образом, при реальном проектировании зданий и сооружений, в особенности имеющих нестандартные формы, следует моделировать объекты как в аэродинамической трубе, так и в различных программных комплексах, в которых реализованы CFD-технологии.

При дальнейшем изучении данного объекта планируется провести анализ влияния трибун под поверхностью покрытия и сравнить результаты с численным моделированием в ANSYS CFX.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А.М. Прохоров. М. : Советская энциклопедия, 1983. 928 с.

2. Поддаева О.И., Дуничкин И.В. Архитектурно-строительная аэродинамика // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 6 (105). С. 602–609. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.602-609

3. Реттер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика. М. : Стройиздат, 1984. 294 с.

4. Чмовж В.В., Гирька Ю.В. Современные проблемы аэродинамики зданий на примере театра оперы и балета города Одессы // Аэрогидродинамика и аэроакустика: проблемы и перспективы. 2009. DOI: 10.13140/RG.2.1.3852.2007

5. Lawson T. Building Aerodynamics. London : Imperial College Press, 2001. 286 p. DOI: 10.1017/S0001924000013130

6. Березин М.А., Катюшин В.В. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций. Новосибирск : ООО «Олден-полиграфия», 2003. 130 с.

7. Попов Н.А., Лебедева И.В., Богачев Д.С., Березин М.М. Воздействие ветровых и снеговых нагрузок на большепролетные покрытия // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 12. С. 71–76.

8. Муцанов В.Ф., Зубенко А.В., Дроздов А.А. Исследование аэродинамических коэффициентов провисающих мембранных покрытий инженерных

сооружений // Металлические конструкции. 2017. Т. 23. № 2. С. 81–96.

9. Гныря А.И., Коробков С.В., Кошин А.А., Терехов В.И. Моделирование ветровых нагрузок при обтекании воздушным потоком системы моделей зданий при вариации их расположения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 4. С. 65–73.

10. Хазов П.А., Февральских А.В., Лампси Б.Б., Щелокова Ю.Д., Анущенко А.М. Экспериментальное исследование распределения ветровой нагрузки на поверхность большепролетного здания // Приволжский научный журнал. 2019. № 2 (50). С. 9–16.

11. Лампси Б.Б., Шилов С.С., Хазов П.А., Февральских А.В. Определение аэродинамических коэффициентов большепролетного покрытия экспериментальным методом // Приволжский научный журнал. 2021. № 3 (59). С. 17–24.

12. Tominaga Y., Blocken B. Wind tunnel experiments on cross-ventilation flow of a generic building with contaminant dispersion in unsheltered and sheltered conditions // Building and Environment. 2015. Vol. 92. Pp. 452–461. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.05.026

13. Кошин А.А. Анализ динамического воздействия воздушного потока на тандем моделей высотных зданий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 2 (43). С. 134–141.

14. Gelbashts D., Buyruk A., Sahin B., Karabulut K., Alnak A. Experimental and numerical study of the effect of the coating on the characteristics of the wind flow between adjacent buildings // 8-th International Conference on Advanced Technologies. Elazig, 2017. Pp. 1648–1655.

15. Mohamed A., White K., Watkins S. Comparison of the numerical study of the effect of building protrusion aerodynamics with the results of aerodynamic tests // 15th Australian wind energy society workshop. Sydney, 2012. 4 p.

16. Лебедев П.В. Возможности численного моделирования в проблеме определения высотных зданий и сооружений атмосферным ветром в условиях городской застройки // Материалы VIII Международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики». М. : МЦНМО, 2008. С. 96–97.

17. Анущенко А.М., Ерофеев В.И., Хазов П.А., Сатанов А.А., Февральских А.В. Исследование обтекания воздушными потоками большепролетной поверхности численным и экспериментальным методами // Приволжский научный журнал. 2021. № 1 (57). С. 9–18.

18. Hoerner S.F. Fluid-dynamic drag: theoretical, experimental and statistical information. Washington, 1965. 455 p.

19. Гувернюк С.В., Гагарин В.Г. Компьютерное моделирование аэродинамических воздействий на элементы ограждений высотных зданий // Журнал АВОК. 2007. № 1. С. 16–25.

20. Gorji-Bandpy M., Aly A.-M. Aerodynamics. 2021. URL: <https://www.intechopen.com/books/8558>

21. Айранетов А.Б., Вышинский В.В., Камунин А.В. Расчетные и экспериментальные исследования обтекания высотных зданий и сооружений атмосферным ветром в условиях городской застройки // Труды Московского физико-технического института. 2017. Т. 9. № 2 (34). С. 5–12.

22. Темам Р. Уравнения Навье-Стокса. Теория и численный анализ. М. : Мир, 1981. 408 с.

Поступила в редакцию 17 декабря 2021 г.

Принята в доработанном виде 24 января 2022 г.

Одобрена для публикации 24 января 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: **Борис Борисович Лампси** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теории сооружений и технической механики; декан инженерно-строительного факультета; **Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ)**; 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65; SPIN-код: 5493-3763; lampsi@yandex.ru;

**Сергей Сергеевич Шилов** — аспирант кафедры теории сооружений и технической механики; **Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ)**; 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65; инженер-конструктор; **Строй-Снаб**; 603093, г. Нижний Новгород, ул. Печерский съезд, д. 22 а, офис 218; РИНЦ ID: 1135132; sergey.shilov.1997@mail.ru;

**Павел Алексеевич Хазов** — кандидат технических наук, доцент кафедры теории сооружений и технической механики; **Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ)**; 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, д. 65; РИНЦ ID: 809222; khazov.nngasu@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. *Physical encyclopedic dictionary* / ed. by A.M. Prokhorov. Moscow, Soviet Encyclopedia, 1983; 944. (rus.).
2. Poddaeva O.I., Dunichkin I.V. Architectural-building aerodynamics. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(6):(105):602-609. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.602-609 (rus.).
3. Retter E.I. *Architectural and construction aerodynamics*. Moscow, Stroyizdat, 1984; 294. (rus.).
4. Chmovzh V.V., Girka Yu.V. Modern problems of aerodynamics of buildings on the example of the Opera and Ballet Theater of the city of Odessa. *Aerohydrodynamics and Aeroacoustics: Problems and Prospects*. 2009. DOI: 10.13140/RG.2.1.3852.2007 (rus.).
5. Lawson T. *Building Aerodynamics*. London, Imperial College Press, 2001; 286. DOI: 10.1017/S0001924000013130
6. Berezin M.A., Katyushin V.V. *Atlas of aerodynamic characteristics of building structures*. Novosibirsk, Olden-polygraphy LLC, 2003; 138. (rus.).
7. Popov N.A., Lebedeva I.V., Bogachev D.S., Berezin M.M. The impact of wind and snow loads on long-span coatings. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 12:71-76. (rus.).
8. Mushchanov V., Zubenko H., Drozdov A. Researches of aerodynamic coefficients of deflect membrane roof of engineer constructions. *Metall Constructions*. 2017; 23(2):81-96. (rus.).
9. Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Koshin A.A., Terkhov V.I. Simulation of wind-induced airflow round building models with different arrangement. *Journal of Construction and Architecture*. 2018; 4:65-73. (rus.).
10. Khazov P.A., Fevralskykh A.V., Lampsi B.B., Schyolokova Y.D., Anuschenko A.M. Experimental study of wind load distribution on the surface of large-span buildings. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2019; 2:9-16. (rus.).
11. Lampsi B.B., Shilov S.S., Khazov P.A., Fevralskykh A.V. Determination of aerodynamic coefficients of a large-span coverage by an experimental method. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2021; 3(59):17-24. (rus.).
12. Tominaga Y., Blocken B. Wind tunnel experiments on cross-ventilation flow of a generic building with contaminant dispersion in unsheltered and sheltered conditions. *Building and Environment*. 2015; 92:452-461. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.05.026
13. Koshin A.A. Analysis of airflow dynamic impact on tandem-arranged high-rise building models. *Journal of Construction and Architecture*. 2014; 2(43):134-141. (rus.).
14. Gelbashts D., Buyruk A., Sahin B., Karabulut K., Alnak A. Experimental and numerical study of the effect of the coating on the characteristics of the wind flow between adjacent buildings. *8-th International Conference on Advanced Technologies*. Elazig, 2017; 1648-1655.
15. Mohamed A., White K., Watkins S. Comparison of the numerical study of the effect of building protrusion aerodynamics with the results of aerodynamic tests. *15th Australian wind energy society workshop*. Sydney, 2012; 4.
16. Lebedev P.V. Possibilities of numerical modeling in the problem of determining high-rise buildings and structures by atmospheric winds in urban conditions. *Materials of the VIII International school-seminar "Models and methods of aerodynamics"*. Moscow, ICNMO, 2008; 96-97. (rus.).
17. Anuschenko A.M., Erofeev V.I., Khazov P.A., Satanov A.A., Fevralskykh A.V. Study of air flows streamlining of a large-span surface by numerical and experimental methods. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2021; 1(57):9-18. (rus.).
18. Hoerner S.F. *Fluid-dynamic drag: theoretical, experimental and statistical information*. Washington, 1965; 455.
19. Gouvernyuk S.V., Gagarin V.G. Computer modeling of aerodynamic effects on elements of fences of high-rise buildings. *AVOK Magazine*. 2007; 1:16-25. (rus.).
20. Gorji-Bandpy M., Aly A.-M. *Aerodynamics*. 2021. URL: <https://www.intechopen.com/books/8558>
21. Airapetov A.B., Vyshinsky V.V., Katunin A.V. Computational and experimental studies of the flow of high-rise buildings and structures by atmospheric wind in urban conditions. *Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*. 2017; 9(2):(34):5-12. (rus.).
22. Temam R. *Navier-Stokes equations. Theory and numerical analysis*. Moscow, Mir, 1981; 408. (rus.).

Received December 17, 2021.

Adopted in revised form on January 24, 2022.

Approved for publication on January 24, 2022.

BIONOTES: **Boris B. Lampsi** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Theory of Structures and Technical Mechanics; Dean of the Faculty of Civil Engineering; **Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU)**; 65 Il'inskya st., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation; SPIN-code: 5493-3763; lampsi@yandex.ru;

**Sergey S. Shilov** — postgraduate student of the Department of Theory of Structures and Technical Mechanics; **Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU)**; 65 Il'inskya st., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation; structural engineer; **Stroy-Snab**; office 218, 22 a Pechersky congress st., Nizhny Novgorod, 603093, Russian Federation; ID RISC: 1135132; sergey.shilov.1997@mail.ru;

**Pavel A. Khazov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Theory of Structures and Technical Mechanics; **Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (NNGASU)**; 65 Il'inskya st., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation; ID RISC: 809222; khazov.nngasu@mail.ru.

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

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Вейвлет-реализация дискретно-континуального метода конечных элементов на основе В-сплайнов для локального решения двумерной задачи теории упругости

Павел Алексеевич Акимов, Марина Леонидовна Мозгалева

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Строится локальное численно-аналитическое решение двумерной задачи теории упругости. Область исследования составляют соответствующие конструкции (например, балки-стенки), у которых по одному из направлений имеется регулярность (постоянство) физико-геометрических параметров (модуль упругости материала конструкции, коэффициент Пуассона материала конструкции, размеры поперечного сечения конструкции). Это направление условно называется основным.

**Материалы и методы.** Для решения указанной задачи используется вейвлет-реализация дискретно-континуального метода конечных элементов (ДКМКЭ) на основе В-сплайнов. Исходная операторная постановка задачи сформулирована с использованием аппарата обобщенных функций в рамках метода стандартной (расширенной) области, предложенного А.Б. Золотовым.

**Результаты.** Рассмотрены некоторые актуальные вопросы построения нормализованных базисных функций В-сплайна, описана техника аппроксимации соответствующих вектор-функций и операторов в рамках ДКМКЭ. По основному направлению задача остается континуальной и ищется точное аналитическое решение, тогда как по неосновному направлению используется конечно-элементная аппроксимация в сочетании с аппаратом вейвлет-анализа. В результате формируется дискретно-континуальная постановка задачи, представляющая собой многоточечную (в частности, двухточечную) краевую задачу для системы обыкновенных дифференциальных уравнений (первого порядка) с постоянными коэффициентами, для решения которой может быть применен разработанный и описанный в публикациях авторов корректный аналитический метод. В верификационных целях рассмотрен простейший пример расчета балки-стенки, закрепленной по боковым граням в обоих направлениях, под воздействием сосредоточенной в центре нагрузки.

**Выводы.** Решение верификационной задачи предложенным методом хорошо согласовывалось с решением, полученным на основе метода конечных элементов (были построены соответствующие решения с учетом и без учета локализации, которые практически полностью совпадали, при этом преимущества численно-аналитического подхода достаточно очевидны). Показано, что использование В-сплайнов различной степени в рамках вейвлет-реализации ДКМКЭ приводит к значительному сокращению количества неизвестных.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дискретно-континуальный метод конечных элементов, вейвлет-реализация, В-сплайны, расчеты конструкций, балка-стенка, локальное решение, дискретно-континуальная операторная постановка, метод стандартной (расширенной) области

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Акимов П.А., Мозгалева М.Л. Вейвлет-реализация дискретно-континуального метода конечных элементов на основе В-сплайнов для локального решения двумерной задачи теории упругости // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 1. С. 32–41. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.32-41

Автор, ответственный за переписку: Павел Алексеевич Акимов, AkimovPA@gmail.com.

## B-spline wavelet discrete-continual finite element method for the local solution to the two-dimensional problem of the theory of elasticity

Pavel A. Akimov, Marina L. Mozgaleva

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

### ABSTRACT

**Introduction.** The distinctive article presents a local semi-analytical solution to the problem of the two-dimensional theory of elasticity. The corresponding structures, featuring the regularity (constancy) of physical and geometric parameters (the modulus of elasticity of the material of the structure, the Poisson's ratio of the material of the structure, dimensions of the cross section of the structure) along one direction (dimension) are under consideration. This direction is conventionally called the basic direction.

**Materials and methods.** The B-spline wavelet discrete-continual finite element method (DCFEM) is used. The initial operational formulation of the problem was constructed using the theory of distribution and the so-called method of extended domain, proposed by Prof. Alexander B. Zolotov.

**Results.** Some topical issues of construction of normalized basis functions of a B-spline are considered, the approximation technique for corresponding vector functions and operators within DCFEM is described. Along the basic direction, the problem remains continual and an exact analytical solution can be obtained, while along the non-basic direction the finite element approximation is used in combination with a wavelet analysis apparatus. As a result, we can obtain a discrete-continual formulation of the problem. Thus, we have a multi-point (in particular, a two-point) boundary problem for the first-order system of ordinary differential equations with constant coefficients. A special correct analytical method for the solution of such problems was developed, described and verified in numerous papers written by the authors. In particular, we consider the simplest sample analysis of a deep beam, fixed along the side faces and subjected to the load concentrated in the centre of the structure.

**Conclusions.** The solution to the verification problem obtained using the proposed version of the wavelet-based DCFEM was in good agreement with the solution obtained using a conventional finite element method (corresponding solutions were constructed with localization and without localization; these solutions coincide almost completely, while the advantages of the numerical-analytical approach are quite obvious). It is shown that the use of B-splines of various degrees within the wavelet-based DCFEM leads to a significant reduction in the number of unknowns.

**KEYWORDS:** discrete-continual finite element method, wavelet-based method, B-splines, structural analysis, deep beam, local solution, discrete-continuous operational formulation, method of extended domain

**FOR CITATION:** Akimov P.A., Mozgaleva M.L. B-spline wavelet discrete-continual finite element method for the local solution to the two-dimensional problem of the theory of elasticity. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(1):32-41. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.32-41 (rus.).

Corresponding author: Pavel A. Akimov, AkimovPA@gmail.com.

## ВВЕДЕНИЕ

За последние годы было опубликовано немало работ, посвященных различным вариантам вейвлет-реализаций метода конечных элементов (МКЭ), основанных на использовании сплайн-вейвлетов [1–11]. Различные варианты вейвлет-реализаций МКЭ на основе сплайн-вейвлетов применительно к разным задачам расчета (в том числе на этапе мониторинга состояния) строительных конструкций, включая некоторые вопросы построения новых типов конечных элементов (в том числе вейвлет-элементов), описаны в трудах П.А. Акимова [2, 7–11], Т.Б. Кайтукова [2, 7, 8, 10, 11], М.Л. Мозгалева [2, 7–11], X.F. Chen [12–20], D.P. Chen [21], H.B. Dong [14], J.G. Han [22–25], Y.M. He [16], Z.H. He [18], Z.J. He [12–17, 19, 20], Y. Huang [22–25], Z.S. Jiang [26], B. Li [12, 14, 16, 17], M. Liang [27, 28], J.Q. Long [29], G. Ma [29], T. Matsumoto [26, 29], S.T. Mau [30], H.H. Miao [17], Q.M. Mo [18], T.H.H. Pian [21, 30, 31], K. Sumihara [31], P. Tong [30], K.Y. Qi [14], W.X. Ren [22–25], Y.W. Wang [26], J.W. Xiang [12, 15, 16, 18, 26–29, 32], Z.B. Yang [13, 17, 19], X.W. Zhang [13, 19, 20], Y.H. Zhang [15], Y.T. Zhong [32].

Как показано в исследованиях перечисленных специалистов, предложенные ими подходы эффективны с точки зрения численной реализации, в том числе при наличии сингулярностей обладают высокой точностью, быстрой сходимостью и могут рассматриваться как альтернатива стандартному МКЭ. Настоящая работа продолжает серию статей авторов [2, 7–11], развивающих теорию и приложения вейвлет-реализаций дискретно-континуального метода конечных элементов (ДКМКЭ) [1–11].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пусть  $x_2$  — переменная, соответствующая основному направлению. Операторная постановка в рамках метода стандартной области [5] с учетом выделения основного направления определяется уравнением:

$$-L_{uu} \partial_2^2 \bar{u} + L_{uv} \partial_2 \bar{u} + L_0 \bar{u} = \bar{F}, \quad (1)$$

где  $\bar{F} = \theta \bar{F} + \delta_\Gamma \bar{f}$ ;

$$L_{vv} = D_2^T C D_2, \quad L_{uv} = \partial_1^* D_1^T C D_2 - D_2^T C D_1 \partial_1, \quad (2)$$

$$L_{uu} = \partial_1^* D_1^T C D_1 \partial_1.$$

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, \quad \bar{v} = \partial_2 \bar{u} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix},$$

$$D_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$C = \begin{bmatrix} 2\mu + \lambda & \lambda & 0 \\ \lambda & 2\mu + \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix},$$

$$\partial_k = \frac{\partial}{\partial x_k}, \quad k = 1, 2,$$

где  $x_1, x_2$  — используемые декартовы координаты;  $l_1, l_2$  — соответствующие габаритные размеры конструкции;  $\Omega$  — область, занимаемая конструкцией,  $\Omega = \{(x_1, x_2) / 0 < x_1 < l_1, 0 < x_2 < l_2\}$ ;  $\Gamma = \partial\Omega$  — граница области  $\Omega$ ;  $\theta$  — характеристическая функция области  $\Omega$ ;  $\delta_\Gamma$  — дельта-функция границы  $\Gamma$ ;  $\bar{u}$  — вектор перемещений;  $\bar{F}$  — вектор нагрузок в обла-

сти  $\Omega$ ;  $\bar{f}$  — вектор нагрузок на границе области  $\Gamma = \partial\Omega$ ;  $\lambda, \mu$  — параметры Ламе.

С учетом обозначений в выражении (3) можем переписать уравнение (1) в виде системы дифференциальных уравнений с операторными коэффициентами:

$$\bar{U}' = \tilde{L}\bar{U} + \tilde{F}, \quad (4)$$

где

$$\tilde{L} = \begin{bmatrix} 0 & E \\ L_{vv}^{-1}L_{uu} & L_{vv}^{-1}L_{uv} \end{bmatrix}, \quad \tilde{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ -L_{vv}^{-1}\bar{F} \end{bmatrix}, \quad \bar{U} = \begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

которая дополняется граничными условиями в сечениях с координатами  $x_{2,1}^b = 0, x_{2,2}^b = l_2$ .

Построение базисных функций В-сплайна определяется рекурсивными формулами Кокса-де Бура:

$$k = 1/\varphi_{i,1}(t) = \begin{cases} 1, & x_i \leq t < x_{i+1}, \\ 0, & t < x_i \vee t \geq x_{i+1}, \end{cases}$$

$$k \geq 2/\varphi_{i,k}(t) = \frac{(t-x_i)\varphi_{i,k-1}(t)}{x_{i+k-1}-x_i} + \frac{(x_{i+k}-t)\varphi_{i+1,k-1}(t)}{x_{i+k}-x_{i+1}}. \quad (6)$$

Будем рассматривать такое построение для  $x_i = i$  — целые числа. Тогда можно показать, что справедливы следующие формы соответственно для четных и нечетных значений параметра  $k$ :

$$k = 2m/\varphi_{0,k}(t) = \frac{1}{(2m-1)!} \frac{1}{2} (\Delta_2)^m ((t-m)^{2m-2} |t-m|),$$

$$k = 2m+1/\varphi_{0,k}(t) = \frac{1}{(2m)!} \frac{1}{2} \Delta_1 (\Delta_2)^m ((t-m)^{2m-1} |t-m|), \quad (7)$$

где  $\Delta_1$  — оператор первой разности;  $\Delta_2$  — оператор второй разности;  $\varphi_{i,k}(t) = \varphi_{0,k}(t-i)$ ;  $\varphi_{0,k}(t)$  является полиномом степени  $k-1$  с ограниченным носителем, равным интервалу  $[0, k]$ ;

$$\sum_i \varphi_{0,k}(t-i) \equiv 1 \text{ для любого значения } t. \quad (8)$$

Дискретная составляющая численного решения представлена направлением вдоль оси  $x_1$ . Восполнение на элементе (отрезке) для всех компонентов вектор-функций  $\bar{u}$  и  $\bar{v}$  (см. выражение (3)) одинаковое. Поэтому для простоты изложения при последующих построениях обозначим  $x = x_1, \ell = \ell_1$  и  $y = y(x)$  — неизвестная функция (компонента вектор-функции). Разобьем отрезок  $(0, \ell)$  на  $N_e$  частей (элементов),  $h_e = \ell/N_e$  — длина элемента. Каждый элемент разобьем также на  $N_k$  частей. При этом на элементах локализации решения  $N_k$  имеет большее значение, чем на остальных элементах.

Приведем далее несколько примеров. Так, на элементах локализации можно задать  $N_k = 5$ , т.е. неизвестные функции будут представлены полиномами (В-сплайнами) пятой степени. Обозначим:  $i_e$  — номер элемента;  $N_p = N_k + 1 = 6$  — количество узлов на элементе;  $x_1(i_e)$  и  $x_6(i_e)$  — соответственно координаты начальной и конечной точек  $i_e$ -го элемента. Таким образом, количество неизвестных на элементе при такой разбивке равно  $N_{ie} = 2N_p = 12$ . Если на элементах локализации задать меньшее значение  $N_k$ , например  $N_k = 3$ , то неизвестные функции будут представлены полиномами (В-сплайнами) третьей степени,  $N_p = N_k + 1 = 4, N_{ie} = 2N_p = 8, x_1(i_e)$  и  $x_4(i_e)$  — соответственно координаты начальной и конечной точек  $i_e$ -го элемента. Если на элементах локализации задать значение  $N_k = 1$ , то неизвестные функции будут представлены полиномами (В-сплайнами) первой степени,  $N_p = N_k + 1 = 2, N_{ie} = 2N_p = 4, x_1(i_e)$  и  $x_2(i_e)$  — соответственно координаты начальной и конечной точек  $i_e$ -го элемента.

Переход к локальным координатам осуществляется по формуле:

$$t = (x - x_{1(i_e)})/h_e,$$

$$x_{1(i_e)} \leq x \leq x_{N_p(i_e)}, \quad (9)$$

$$0 \leq t \leq 1.$$

В случае  $N_{ie} = 12$  для представления неизвестной функции прогиба воспользуемся В-сплайном степени 5. Обозначим

$$\varphi(t) = \frac{1}{5!} \frac{1}{2} (\Delta_2)^3 (t^4 |t|) = \frac{1}{5!} \frac{1}{2} [(t+3)^4 |t+3| - 6(t+2)^4 |t+2| + 15(t+1)^4 |t+1| - 20t^4 |t| + 15(t-1)^4 |t-1| - 6(t-2)^4 |t-2| + (t-3)^4 |t-3|]. \quad (10)$$

Эта функция является В-сплайном, симметричным относительно  $t = 0$ , и ее носитель определен интервалом  $[-3, 3]$ .

В качестве базисных функций на единичном отрезке принимаются следующие функции:

$$\varphi_1(t) = \varphi(t+2), \quad \varphi_2(t) = \varphi(t+1),$$

$$\varphi_3(t) = \varphi(t), \quad \varphi_4(t) = \varphi(t-1),$$

$$\varphi_5(t) = \varphi(t-2), \quad \varphi_6(t) = \varphi(t-3),$$

$$0 \leq t \leq 1. \quad (11)$$

В случае  $N_{ie} = 8$  для представления неизвестной функции прогиба воспользуемся В-сплайном степени 3. Обозначим

$$\varphi(t) = \frac{1}{3!} \frac{1}{2} (\Delta_2)^2 (t^2 |t|) = \frac{1}{3!} \frac{1}{2} [(t+2)^2 |t+2| - 4(t+1)^2 |t+1| + 6t^2 |t| - 4(t-1)^2 |t-1| - (t-2)^2 |t-2|]. \quad (12)$$

Эта функция является В-сплайном, симметричным относительно  $t = 0$ , и ее носитель определен интервалом  $[-2, 2]$ .

В качестве базисных функций на единичном отрезке принимаются следующие четыре функции:

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) &= \varphi(t+1), \quad \varphi_2(t) = \varphi(t), \\ \varphi_3(t) &= \varphi(t-1), \quad \varphi_4(t) = \varphi(t-2), \end{aligned} \quad (13)$$

$$0 \leq t \leq 1.$$

В случае  $N_{ie} = 4$  для представления неизвестной функции прогиба воспользуемся В-сплайном степени 3. Обозначим

$$\varphi(t) = \frac{1}{2} \Delta_2 |t| = \frac{1}{2} [|t+1| - 2|t| + |t-1|], \quad (14)$$

$$T_6 = \mathbf{1} \begin{bmatrix} \varphi_1(0) & \varphi_2(0) & \varphi_3(0) & \varphi_4(0) & \varphi_5(0) & \varphi_6(0) \\ \varphi_1(0,2) & \varphi_2(0,2) & \varphi_3(0,2) & \varphi_4(0,2) & \varphi_5(0,2) & \varphi_6(0,2) \\ \varphi_1(0,4) & \varphi_2(0,4) & \varphi_3(0,4) & \varphi_4(0,4) & \varphi_5(0,4) & \varphi_6(0,4) \\ \varphi_1(0,6) & \varphi_2(0,6) & \varphi_3(0,6) & \varphi_4(0,6) & \varphi_5(0,6) & \varphi_6(0,6) \\ \varphi_1(0,8) & \varphi_2(0,8) & \varphi_3(0,8) & \varphi_4(0,8) & \varphi_5(0,8) & \varphi_6(0,8) \\ \varphi_1(1) & \varphi_2(1) & \varphi_3(1) & \varphi_4(1) & \varphi_5(1) & \varphi_6(1) \end{bmatrix}, \quad \bar{y}^{ie} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \end{bmatrix}, \quad \bar{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{bmatrix}; \quad (17)$$

при  $N_p = 4$ , имеем  $\bar{y}^{ie} = T_4 \bar{\alpha}$ ;

$$T_4 = \begin{bmatrix} \varphi_1(0) & \varphi_2(0) & \varphi_3(0) & \varphi_4(0) \\ \varphi_1(1/3) & \varphi_2(1/3) & \varphi_3(1/3) & \varphi_4(1/3) \\ \varphi_1(2/3) & \varphi_2(2/3) & \varphi_3(2/3) & \varphi_4(2/3) \\ \varphi_1(1) & \varphi_2(1) & \varphi_3(1) & \varphi_4(1) \end{bmatrix}, \quad \bar{y}^{ie} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix}, \quad \bar{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix}; \quad (18)$$

при  $N_p = 2$ , имеем  $\bar{y}^{ie} = T_2 \bar{\alpha}$ ;

$$T_2 = \begin{bmatrix} \varphi_1(0) & \varphi_2(0) \\ \varphi_1(1) & \varphi_2(1) \end{bmatrix}, \quad \bar{y}^{ie} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}, \quad \bar{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где  $\bar{y}^{ie}$  — вектор узловых неизвестных на элементе  $i_e$ .

В общем случае имеем:

$$\bar{\alpha} = T_{N_p}^{-1} \bar{y}^{ie}, \quad (20)$$

где  $T_{N_p} = \{T_{ij}\}_{i,j=1,\dots,N_p}$ ,  $T_{ij} = \varphi_j(t_i)$ .

Введем следующие обозначения:

$$\bar{u}^{ie} = \begin{bmatrix} \bar{u}^1 \\ \vdots \\ \bar{u}^{N_p} \end{bmatrix}, \quad \bar{u}^i = \begin{bmatrix} u_1^i \\ u_2^i \end{bmatrix}, \quad \bar{u}_k^{ie} = \begin{bmatrix} u_k^1 \\ \vdots \\ u_k^{N_p} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где  $\bar{u}^{ie}$  — узловые значения вектор-функции на элементе  $i_e$ ;  $\bar{u}^i$  — значение вектор-функции в  $i$ -м узле на элементе  $i_e$ ;  $\bar{u}_k^{ie}$  — узловые значения  $k$ -й компоненты вектор-функции на элементе  $i_e$ ,  $k = 1, 2$ .

Пусть  $P$  — матрица перестановок, такая, что

Эта функция является В-сплайном, симметричным относительно  $t = 0$ , и ее носитель определен интервалом  $[-1, 1]$ .

В качестве базисных функций на единичном отрезке принимаются следующие функции:

$$\varphi_1(t) = \varphi(t), \quad \varphi_2(t) = \varphi(t-1), \quad 0 \leq t \leq 1. \quad (15)$$

Представим неизвестную функцию прогиба  $y(x)$  на элементе  $i_e$  в виде

$$y(x) = w(t) = \sum_{k=1}^{N_{ie}} \alpha_k \varphi_k(t), \quad (16)$$

$$x_{1(i_e)} \leq x \leq x_{N_p(i_e)}, \quad 0 \leq t \leq 1.$$

Можно показать, что справедливы следующие формулы:

при  $N_p = 6$ , имеем  $\bar{y}^{ie} = T_6 \bar{\alpha}$ ;

$$\bar{u}^{ie} = P \begin{bmatrix} \bar{u}_1^{ie} \\ \bar{u}_2^{ie} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & 0 & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & 1 & \vdots & \vdots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix},$$

откуда в силу  $P^{-1} = P^T$  имеем  $\begin{bmatrix} \bar{u}_1^{ie} \\ \bar{u}_2^{ie} \end{bmatrix} = P^T \bar{u}^{ie}$ .

Для построения локальных матриц жесткости, соответствующих операторам  $L_{uu}$ ,  $L_{uv}$  и  $L_{vv}$  (см. выражение (2)), рассмотрим на элементе  $i_e$  билинейные формы:

$$\begin{aligned} (L_{uu} \bar{u}, \bar{z}) &= (\partial^* D_1^T C D_1 \partial \bar{u}, \bar{z}) = (D_1^T C D_1 \partial \bar{u}, \partial \bar{z}) = \\ &= \int_{x_{1(i_e)}}^{x_{N_p(i_e)}} \left( \begin{bmatrix} 2\mu + \lambda \\ \mu \end{bmatrix} \partial \bar{u}, \partial \bar{z} \right) dx; \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} (L_{uv}\bar{u}, \bar{z}) &= (\partial^* D_1^T CD_2 \bar{u} - D_2^T CD_1 \partial \bar{u}, \bar{z}) = \\ &= (D_1^T CD_2 \bar{u}, \partial \bar{z}) - (D_2^T CD_1 \partial \bar{u}, \bar{z}) = \end{aligned} \quad (24)$$

$$= \int_{x_1(i_e)}^{x_{N_p}(i_e)} \left( \begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \end{bmatrix} \bar{u}, \partial \bar{z} \right) dx - \int_{x_1(i_e)}^{x_{N_p}(i_e)} \left( \begin{bmatrix} \mu \\ \lambda \end{bmatrix} \partial \bar{u}, \bar{z} \right) dx;$$

$$\begin{aligned} (L_{vv}\bar{u}, \bar{z}) &= (D_2^T CD_2 \bar{u}, \bar{z}) = \\ &= \int_{x_1(i_e)}^{x_{N_p}(i_e)} \left( \begin{bmatrix} \mu \\ 2\mu + \lambda \end{bmatrix} \bar{u}, \bar{z} \right) dx, \end{aligned} \quad (25)$$

на функциях вида (12):

$$\begin{aligned} \bar{u}(x) &= \bar{w}(t) = \sum_{j=1}^{N_p} \varphi_j(t) \bar{\alpha}^j, \\ \bar{z}(x) &= \bar{q}(t) = \sum_{j=1}^{N_p} \varphi_j(t) \bar{\beta}^j, \\ x_{1(i_e)} \leq x \leq x_{N_p(i_e)}, \quad 0 \leq t \leq 1, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\bar{\alpha}^j = \begin{bmatrix} \alpha_1^j \\ \alpha_2^j \end{bmatrix}, \quad \bar{\beta}^j = \begin{bmatrix} \beta_1^j \\ \beta_2^j \end{bmatrix},$$

$$j = 1, \dots, N_p.$$

Можно показать, что, подставив выражение (26) последовательно в формулы (23)–(25), получим:

$$(L_{uu}\bar{u}, \bar{z}) = (K_{uu}^{ie} \bar{u}^{ie}, \bar{z}^{ie}),$$

где  $K_{uu}^{ie} = P \begin{bmatrix} (2\mu + \lambda)A_{11} & \\ & A_{11} \end{bmatrix} P^T,$  (27)

$$A_{11} = (T_{N_p}^{-1})^T B T_{N_p}^{-1};$$

$$B = \{b_{i,j}\}_{i,j=1,\dots,N_p},$$

где  $b_{ij} = \frac{1}{h_e} \int_0^1 \varphi_i'(t) \varphi_j'(t) dt,$  (28)

причем  $b_{j,i} = b_{i,j}$ , т.е.  $B^T = B$ ;

$$(L_{uv}\bar{u}, \bar{z}) = (K_{uv}^{ie} \bar{u}^{ie}, \bar{z}^{ie}), \text{ где } K_{uv}^{ie} = K_{uv,1}^{ie} - K_{uv,2}^{ie}, \quad (29)$$

причем  $K_{uv,2}^{ie} = (K_{uv,1}^{ie})^T$ ;

$$K_{uv,1}^{ie} = P \begin{bmatrix} 0 & \lambda A_{10} \\ \mu A_{10} & 0 \end{bmatrix} P^T, \quad A_{10} = (T_{N_p}^{-1})^T R T_{N_p}^{-1}, \quad (30)$$

$$K_{uv,2}^{ie} = P \begin{bmatrix} 0 & \mu A_{01} \\ \lambda A_{01} & 0 \end{bmatrix} P^T, \quad A_{01} = (T_{N_p}^{-1})^T S T_{N_p}^{-1};$$

$$R = \{r_{i,j}\}_{i,j=1,\dots,N_p}, \quad (31)$$

где  $r_{i,j} = \int_0^1 \varphi_i'(t) \varphi_j(t) dt,$   $S = \{s_{i,j}\}_{i,j=1,\dots,N_p},$

где  $s_{i,j} = \int_0^1 \varphi_i(t) \varphi_j'(t) dt,$  т.е.  $R^T = S$ ;

$$(L_{vv}\bar{u}, \bar{z}) = (K_{vv}^{ie} \bar{u}^{ie}, \bar{z}^{ie}),$$

где  $K_{vv}^{ie} = P \begin{bmatrix} \mu A_{00} & \\ & (2\mu + \lambda)A_{00} \end{bmatrix} P^T,$  (32)

$$A_{00} = (T_{N_p}^{-1})^T M T_{N_p}^{-1};$$

$$M = \{m_{i,j}\}_{i,j=1,\dots,N_p},$$

где  $m_{ij} = \frac{1}{h_e} \int_0^1 \varphi_i(t) \varphi_j(t) dt,$  (33)

причем  $m_{j,i} = m_{i,j}$ , т.е.  $M^T = M$ ;

$\bar{u}^{ie}, \bar{z}^{ie}$  — соответствующие векторы узловых неизвестных на элементе  $i_e$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве модельного примера рассмотрим определение перемещений балки-стенки, закрепленной по боковым граням в обоих направлениях, под воздействием сосредоточенной в центре нагрузки (рис. 1).

Геометрические параметры:  $\ell_1 = 6$  м,  $\ell_2 = 12$  м. Расчетные параметры материала балки-стенки: коэффициент упругости  $E = 26\,500 \cdot 10^4$  кН/м<sup>2</sup>, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,15$ . Параметр внешней нагрузки:  $P = 100$  кН.

Рассмотрим расчет с учетом локализации. Зададим  $N_e = 4$  — количество элементов. Длина элемента  $h_e = \ell_1/N_e = 6/4 = 1,5$ . Определим локализацию решения в зоне нагрузки. Элемент 1:  $N_k = 5$  — сплайн пятого порядка,  $h_1 = 1,5/5 = 0,3$  — шаг между узлами на элементе. Элемент 2:  $N_k = 3$  — сплайн третьего порядка,  $h_1 = 1,5/3 = 0,5$  — шаг между узлами на элементе. Элементы 3 и 4:  $N_k = 1$  — сплайн первого порядка,  $h_3 = h_4 = h = 1,5/1 = 1,5$  — шаг между узлами на элементе. При таком разбиении суммарное количество узлов по всем элементам составляет  $N_x = 5 + 3 + 2 \cdot 1 + 1 = 11$ . Общее количество неизвестных узловых значений для перемещений  $\bar{u}, \bar{v}$ :  $N_g = 4 \cdot N_x = 4 \cdot 11 = 44$ .

Рассмотрим также расчет без учета локализации. В этом случае будем исследовать только стан-

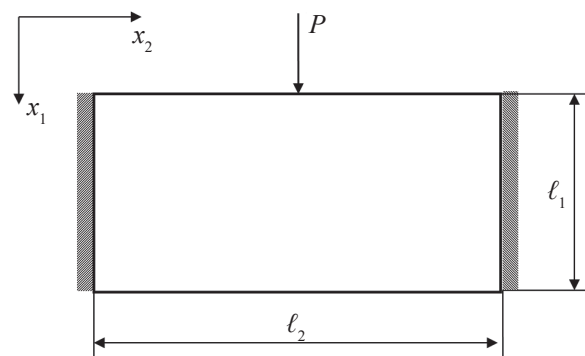


Рис. 1. Пример расчета (к постановке задачи)

Fig. 1. The example of the analysis (in respect of the problem statement)

дартное линейное восполнение. При этом длина элемента принимается равной минимальному шагу между узлами, т.е.  $h_e = 0,3$ . Тогда количество элементов  $N_e = 6/0,3 = 20$  и общее количество узлов  $N_x = 21$ . В этом случае общее количество узловых неизвестных для перемещений  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ :  $N_g = 4 \cdot N_x = 4 \cdot 21 = 84$ .

Представлено графическое сопоставление результатов счета (рис. 2), при этом FEM:loc — узловые значения, полученные с учетом локализации;

FEM:standart — узловые значения, полученные без учета локализации.

Как видно, полученные результаты практически полностью совпадают. И при этом применение локализации на основе использования В-сплайнов различной степени приводит к существенному уменьшению количества неизвестных. Разница для рассматриваемого примера составляет  $\Delta = 84 - 44 = 40$ .

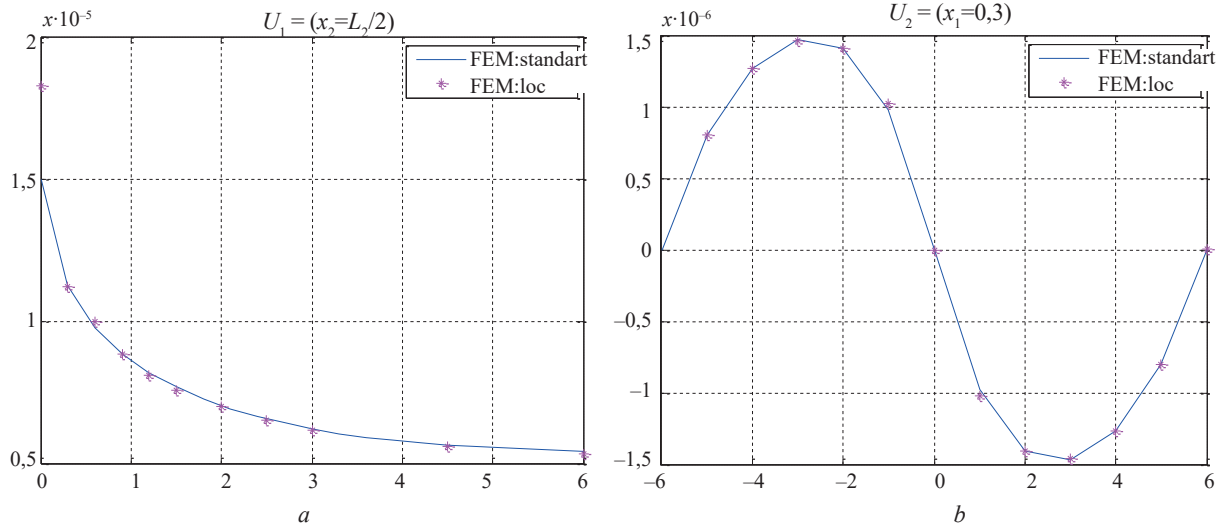


Рис. 2. Сопоставление результатов счета в срединных сечениях: а — по направлению  $x_2$ ; б — по направлению  $x_1$   
Fig. 2. Comparison of the results of analysis made in the middle sections: a — along the  $x_2$  direction; b — along the  $x_1$  direction

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Итак, в настоящей статье представлена вейвлет-реализация ДКМКЭ на основе В-сплайнов для решения двумерной задачи теории упругости. Рассматриваются конструкции, у которых по одному из направлений имеется регулярность (постоянство) физико-геометрических параметров. Исходной является операторная постановка задачи в рамках

метода расширенной (стандартной) области, реализован переход к соответствующей дискретно-континуальной постановке, рассмотрено решение верификационного примера, подтвердившее высокую эффективность и точность предложенного подхода, который представляется весьма перспективным с учетом достигаемого значительного сокращения объема вычислительной работы вследствие существенной редукции неизвестных.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам: научное издание / под ред. А.П. Петухова ; пер. с англ. Е.В. Мищенко. М. ; Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 463 с.
2. Акимов П.А., Мозгалева М.Л., Кайтуков Т.Б. Вейвлет-реализация дискретно-континуального метода конечных элементов на основе В-сплайнов для локального расчета пластины // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 5. С. 666–675. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.666-675
3. Akimov P.A. Correct discrete-continual finite element method of structural analysis based on precise analytical solutions of resulting multipoint boundary problems for systems of ordinary differential equations // Applied Mechanics and Materials. 2012.

- Vol. 204–208. Pp. 4502–4505. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.204-208.4502
4. Akimov P.A., Belostosky A.M., Mozgaleva M.L., Aslami M., Negrozov O.A. Correct multilevel discrete-continual finite element method of structural analysis // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1040. Pp. 664–669. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1040.664
5. Akimov P.A., Mozgaleva M.L. Method of extended domain and general principles of mesh approximation for boundary problems of structural analysis // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 580–583. Pp. 2898–2902. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.580-583.2898
6. Akimov P.A., Mozgaleva M.L. Wavelet-based multilevel discrete-continual finite element method for

local plate analysis // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 351–352. Pp. 13–16. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.351-352.13

7. Akimov P.A., Mozgaleva M.L., Kaytukov T.B. Numerical solution of the problem of beam analysis with the use of B-spline finite element method // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2020. Vol. 16. Issue 3. Pp. 12–22. DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-3-12-22

8. Akimov P.A., Mozgaleva M.L., Kaytukov T.B. Numerical solution of the problem of isotropic plate analysis with the use of B-spline discrete-continual finite element method // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2020. Vol. 16. Issue 4. Pp. 14–28. DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-4-14-28

9. Mozgaleva M.L., Akimov P.A. Localization of solution of the problem for Poisson's equation with the use of B-spline discrete-continual finite element method // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. Issue 3. Pp. 157–172. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-3-157-172

10. Mozgaleva M.L., Akimov P.A., Kaytukov T.B. Localization of solution of the problem of isotropic plate analysis with the use of b-spline discrete-continual finite element method // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. Issue 1. Pp. 55–74. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-1-55-74

11. Mozgaleva M.L., Akimov P.A., Kaytukov T.B. Localization of solution of the problem of two-dimensional theory of elasticity with the use of B-spline discrete-continual finite element method // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. Issue 2. Pp. 83–104. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-2-83-104

12. Chen X.F., Xiang J.W., Li B., He Z.J. A study of multiscale wavelet-based elements for adaptive finite element analysis // Advances in Engineering Software. 2010. Vol. 41. Issue 2. Pp. 196–205. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2009.09.008

13. Chen X.F., Yang Z.B., Zhang X.W., He Z.J. Modeling of wave propagation in one-dimension structures using b-spline wavelet on interval finite element // Finite Elements in Analysis and Design. 2012. Vol. 51. Pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.finel.2011.10.007

14. Dong H.B., Chen X.F., Li B., Qi K.Y., He Z.J. Rotor crack detection based on high-precision modal parameter identification method and wavelet finite element model // Mechanical Systems and Signal Processing. 2009. Vol. 23. Issue 3. Pp. 869–883. DOI: 10.1016/j.ymsp.2008.08.003

15. Xiang J.W., Chen X.F., He Z.J., Zhang Y.H. A new wavelet-based thin plate element using b-spline wavelet on the interval // Computational Mechanics. 2007. Vol. 41. Issue 2. Pp. 243–255. DOI: 10.1007/s00466-007-0182-x

16. Xiang J.W., Chen X.F., Li B., He Y.M., He Z.J. Identification of a crack in a beam based on the finite element method of a B-spline wavelet on the interval // Journal of Sound and Vibration. 2006. Vol. 296. Issue 4–5. Pp. 1046–1052. DOI: 10.1016/j.jsv.2006.02.019

17. Yang Z., Chen X., Li B., He Z., Miao H. Vibration analysis of curved shell using b-spline wavelet on the interval (bswi) finite elements method and general shell theory // CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences. 2012. Vol. 85. Issue 2. Pp. 129–156. DOI: 10.3970/cmescs.2012.085.129

18. Xiang J.W., Chen X.F., Mo Q.M., He Z.H. Identification of crack in a rotor system based on wavelet finite element method // Finite Elements in Analysis and Design. 2007. Vol. 43. Issue 14. Pp. 1068–1081. DOI: 10.1016/j.finel.2007.07.001

19. Yang Z.B., Chen X.F., Zhang X.W., He Z.J. Free vibration and buckling analysis of plates using b-spline wavelet on the interval mindlin element // Applied Mathematical Modelling. 2013. Vol. 37. Issue 5. Pp. 3449–3466. DOI: 10.1016/j.apm.2012.07.055

20. Zhang X.W., Chen X.F., He Z.J., Yang Z. The analysis of shallow shells based on multivariable wavelet finite element method // Acta Mechanica Sinica. 2011. Vol. 24. Issue 5. Pp. 450–460. DOI: 10.1016/s0894-9166(11)60044-x

21. Pian T.H.H., Chen D.P. Alternative ways for formulation of hybrid stress elements // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1982. Vol. 18. Issue 11. Pp. 1679–1684. DOI: 10.1002/nme.1620181107

22. Han J.G., Ren W.X., Huang Y. A multivariable wavelet-based finite element method and its application to thick plates // Finite Elements in Analysis and Design. 2005. Vol. 41. Issue 9–10. Pp. 821–833. DOI: 10.1016/j.finel.2004.11.001

23. Han J.G., Ren W.X., Huang Y. A spline wavelet finite-element method in structural mechanics // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2006. Vol. 66. Issue 1. Pp. 166–190. DOI: 10.1002/nme.1551

24. Han J.G., Ren W.X., Huang Y. A spline wavelet finite element formulation of thin plate bending // Engineering with Computers. 2009. Vol. 25. Issue 4. Pp. 319–326. DOI: 10.1007/s00366-009-0124-7

25. Han J.G., Ren W.X., Huang Y. A wavelet-based stochastic finite element method of thin plate bending // Applied Mathematical Modelling. 2007. Vol. 31. Issue 2. Pp. 181–193. DOI: 10.1016/j.apm.2005.08.020

26. Xiang J.W., Matsumoto T., Wang Y.W., Jiang Z.S. Detect damages in conical shells using curvature mode shape and wavelet finite element method // International Journal of Mechanical Sciences. 2013. Vol. 66. Pp. 83–93. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2012.10.010

27. Xiang J.W., Liang M. A two-step approach to multi-damage detection for plate structures // Engineering Fracture Mechanics. 2012. Vol. 91. Pp. 73–86. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2012.04.028.

28. Xiang J.W., Liang M. Wavelet-based detection of beam cracks using modal shape and frequency measurements // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2012. Vol. 27. Issue 6. Pp. 439–454. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2012.00760.x

29. Xiang J.W., Matsumoto T., Long J.Q., Ma G. Identification of damage locations based on operating deflection shape // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2013. Vol. 28. Issue 2. Pp. 166–180. DOI: 10.1080/10589759.2012.716437

30. Mau S.T., Tong P., Pian T.H.H. Finite element solutions for laminated thick plates // *Journal of Com-*

*posite Materials*. 1972. Vol. 6. Issue 2. Pp. 304–311. DOI: 10.1177/002199837200600212

31. Pian T.H.H., Sumihara K. Rational approach for assumed stress finite elements // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1984. Vol. 20. Issue 9. Pp. 1685–1695. DOI: 10.1002/nme.1620200911

32. Zhong Y.T., Xiang J.W. Construction of wavelet-based elements for static and stability analysis of elastic problems // *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2011. Vol. 24. Issue 4. Pp. 355–364. DOI: 10.1016/s0894-9166(11)60036-0

Поступила в редакцию 5 января 2022 г.

Принята в доработанном виде 24 января 2022 г.

Одобрена для публикации 24 января 2022 г.

Об авторах: **Павел Алексеевич Акимов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информатики и прикладной математики, ректор, академик Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 256191, Scopus: 35974766800, ResearcherID: B-4230-2016; AkimovPA@mgsu.ru;

**Марина Леонидовна Мозгалева** — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информатики и прикладной математики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 601631; marina.mozgaleva@gmail.com.

Вклад авторов:

Акимов П.А. — идея, сбор и обработка материала, научное редактирование текста статьи, итоговые выводы.

Мозгалева М.Л. — концепция исследования, развития методологии, сбор и обработка материала, написание исходного текста статьи, разработка реализующего программного обеспечения, численные эксперименты, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets: scientific publication* / ed. by A.P. Petukhov. Moscow; Izhevsk, Regular and chaotic dynamics, 2001; 463. (rus.).

2. Akimov P.A., Mozgaleva M.L., Kaytukov T.B. About the B-spline wavelet discrete-continual finite element method of the local plate analysis. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(6): 666-675. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.666-675 (rus.).

3. Akimov P.A. Correct discrete-continual finite element method of structural analysis based on precise analytical solutions of resulting multipoint boundary problems for systems of ordinary differential equations. *Applied Mechanics and Materials*. 2012; 204-208:4502-4505. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.204-208.4502

4. Akimov P.A., Belostosky A.M., Mozgaleva M.L., Aslami M., Negrozov O.A. Correct multi-level discrete-continual finite element method of structural analysis. *Advanced Materials Research*. 2014; 1040:664-669. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1040.664

5. Akimov P.A., Mozgaleva M.L. Method of extended domain and general principles of mesh approximation for boundary problems of structural analysis. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 580-583:2898-2902. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.580-583.2898

6. Akimov P.A., Mozgaleva M.L. Wavelet-based multilevel discrete-continual finite element method for local plate analysis. *Applied Mechanics and Materials*. 2013; 351-352:13-16. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.351-352.13

7. Akimov P.A., Mozgaleva M.L., Kaytukov T.B. Numerical solution of the problem of beam analysis with the use of B-spline finite element method. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2020; 16(3):12-22. DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-3-12-22

8. Akimov P.A., Mozgaleva M.L., Kaytukov T.B. Numerical solution of the problem of isotropic plate analysis with the use of B-spline discrete-continual finite element method. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2020;

16(4):14-28. DOI: 10.22337/2587-9618-2020-16-4-14-28

9. Mozgaleva M.L., Akimov P.A. Localization of solution of the problem for Poisson's equation with the use of B-spline discrete-continual finite element method. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(3):157-172. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-3-157-172

10. Mozgaleva M.L., Akimov P.A., Kaytukov T.B. Localization of solution of the problem of isotropic plate analysis with the use of b-spline discrete-continual finite element method. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(1):55-74. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-1-55-74

11. Mozgaleva M.L., Akimov P.A., Kaytukov T.B. Localization of solution of the problem of two-dimensional theory of elasticity with the use of B-spline discrete-continual finite element method. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021; 17(2):83-104. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-2-83-104

12. Chen X.F., Xiang J.W., Li B., He Z.J. A study of multiscale wavelet-based elements for adaptive finite element analysis. *Advances in Engineering Software*. 2010; 41(2):196-205. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2009.09.008

13. Chen X.F., Yang Z.B., Zhang X.W., He Z.J. Modeling of wave propagation in one-dimension structures using b-spline wavelet on interval finite element. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2012; 51:1-9. DOI: 10.1016/j.finel.2011.10.007

14. Dong H.B., Chen X.F., Li B., Qi K.Y., He Z.J. Rotor crack detection based on high-precision modal parameter identification method and wavelet finite element model. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009; 23(3):869-883. DOI: 10.1016/j.ymsp.2008.08.003

15. Xiang J.W., Chen X.F., He Z.J., Zhang Y.H. A new wavelet-based thin plate element using b-spline wavelet on the interval. *Computational Mechanics*. 2007; 41(2):243-255. DOI: 10.1007/s00466-007-0182-x

16. Xiang J.W., Chen X.F., Li B., He Y.M., He Z.J. Identification of a crack in a beam based on the finite element method of a B-spline wavelet on the interval. *Journal of Sound and Vibration*. 2006; 296(4-5):1046-1052. DOI: 10.1016/j.jsv.2006.02.019

17. Yang Z., Chen X., Li B., He Z., Miao H. Vibration analysis of curved shell using b-spline wavelet on the interval (bswi) finite elements method and general shell theory. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2012; 85(2):129-156. DOI: 10.3970/cmcs.2012.085.129

18. Xiang J.W., Chen X.F., Mo Q.M., He Z.H. Identification of crack in a rotor system based on wavelet finite element method. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2007; 43(14):1068-1081. DOI: 10.1016/j.finel.2007.07.001

19. Yang Z.B., Chen X.F., Zhang X.W., He Z.J. Free vibration and buckling analysis of plates using b-spline wavelet on the interval mindlin element. *Applied Mathematical Modelling*. 2013; 37(5):3449-3466. DOI: 10.1016/j.apm.2012.07.055

20. Zhang X.W., Chen X.F., He Z.J., Yang Z. The analysis of shallow shells based on multivariable wavelet finite element method. *Acta Mechanica Sinica*. 2011; 24(5):450-460. DOI: 10.1016/s0894-9166(11)60044-x

21. Pian T.H.H., Chen D.P. Alternative ways for formulation of hybrid stress elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1982; 18(11):1679-1684. DOI: 10.1002/nme.1620181107

22. Han J.G., Ren W.X., Huang Y. A multivariable wavelet-based finite element method and its application to thick plates. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2005; 41(9-10):821-833. DOI: 10.1016/j.finel.2004.11.001

23. Han J.G., Ren W.X., Huang Y. A spline wavelet finite-element method in structural mechanics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2006; 66(1):166-190. DOI: 10.1002/nme.1551

24. Han J.G., Ren W.X., Huang Y. A spline wavelet finite element formulation of thin plate bending. *Engineering with Computers*. 2009; 25(4):319-326. DOI: 10.1007/s00366-009-0124-7

25. Han J.G., Ren W.X., Huang Y. A wavelet-based stochastic finite element method of thin plate bending. *Applied Mathematical Modelling*. 2007; 31(2):181-193. DOI: 10.1016/j.apm.2005.08.020

26. Xiang J.W., Matsumoto T., Wang Y.W., Jiang Z.S. Detect damages in conical shells using curvature mode shape and wavelet finite element method. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013; 66:83-93. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2012.10.010

27. Xiang J.W., Liang M. A two-step approach to multi-damage detection for plate structures. *Engineering Fracture Mechanics*. 2012; 91:73-86. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2012.04.028.

28. Xiang J.W., Liang M. Wavelet-based detection of beam cracks using modal shape and frequency measurements. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2012; 27(6):439-454. DOI: 10.1111/j.1467-8667.2012.00760.x

29. Xiang J.W., Matsumoto T., Long J.Q., Ma G. Identification of damage locations based on operating deflection shape. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2013; 28(2):166-180. DOI: 10.1080/10589759.2012.716437

30. Mau S.T., Tong P., Pian T.H.H. Finite element solutions for laminated thick plates. *Journal of Composite Materials*. 1972; 6(2):304-311. DOI: 10.1177/002199837200600212

31. Pian T.H.H., Sumihara K. Rational approach for assumed stress finite elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1984; 20(9):1685-1695. DOI: 10.1002/nme.1620200911

32. Zhong Y.T., Xiang J.W. Construction of elastic problems. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2011; 24(4):355-364. DOI: 10.1016/s0894-9166(11)60036-0

*Received January 5, 2022.*

*Adopted in revised form on January 24, 2022.*

*Approved for publication on January 24, 2022*

**B I O N O T E S:** **Pavel A. Akimov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Informatics and Applied Mathematics, Rector, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 256191, Scopus: 35974766800, ResearcherID: B-4230-2016; AkimovPA@mgsu.ru;

**Marina L. Mozgaleva** — Doctor of Technical Sciences; Associate Professor, Professor of the Department of Informatics and Applied Mathematics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 601631; marina.mozgaleva@gmail.com.

*Contribution of the authors:*

*Akimov P.A. — idea, collection and processing of material, scientific editing of the text of the paper, final conclusions.*

*Mozgaleva M.L. — the concept of research, development of methodology, collection and processing of material, writing the original text of the paper, development of implementing software, numerical experiments, final conclusions.*

*The authors declare no conflict of interest.*

## Особенности определения удельной поверхности порошковых кварцсодержащих систем

Александра Валерьевна Шаманина, Аркадий Михайлович Айзенштадт

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова  
(САФУ имени М.В. Ломоносова); г. Архангельск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Механическое диспергирование минерального сырья до тонкодисперсного состояния способствует эффективному использованию его энергетического потенциала при структурообразовании композиционных материалов. Важным параметром, характеризующим дисперсность и позволяющим оценить способность системы к трансформационным превращениям, является удельная поверхность вещества. Экспериментальное значение удельной поверхности зависит от способа измерения и может отличаться для одних и тех же твердых тел при применении различных методов. Цель исследования — изучение морфологических особенностей поверхности порошковых кварцсодержащих систем разной степени дисперсности, выполненное на основе опытного определения удельной поверхности.

**Материалы и методы.** Выявление значений удельной поверхности механически активированной пробы полиминерального песка проводилось фильтрационным и адсорбционным методами. Тонкодисперсные порошки рассматриваемого песка были получены путем сухого помола в планетарной шаровой мельнице. Анализ полученных результатов осуществлялся с учетом значений поверхностного натяжения исследуемых порошков, как характеристики поверхностной энергии единицы площади поверхности.

**Результаты.** Установлено, что результаты определения удельной поверхности, полученные методом фильтрации газа, являются заниженными в сравнении с данными, полученными методом адсорбции азота. Выявлена линейная функциональная зависимость отношения дисперсионной и поляризационной составляющих поверхностного натяжения и отношения удельных поверхностей, полученных разными методами для одной пробы песка.

**Выводы.** Показатели удельной поверхности, установленные разными методами, несмотря на разницу значений для одной и той же пробы материала, позволяют судить о степени развитости поверхности, наличии активных центров и энергетическом потенциале минеральных порошков. Отношение удельных поверхностей может быть использовано в качестве критерия рационального выбора режимных параметров механической активации кварцсодержащих порошковых систем для увеличения энергетического потенциала поверхности.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** удельная поверхность, дисперсная система, механоактивация, дисперсность, кварц, поверхностное натяжение, структурообразование, газопроницаемость, адсорбция

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках государственного задания № 0793-2020-0005 с использованием уникальной научной установки «Физикохимия поверхности нанодисперсных систем».

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Шаманина А.В., Айзенштадт А.М. Особенности определения удельной поверхности порошковых кварцсодержащих систем // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 1. С. 42–49. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.42-49

Автор, ответственный за переписку: Александра Валерьевна Шаманина, alexandra.shamanina@yandex.ru.

## Features of determining the specific surface area of powdered quartz-containing systems

Aleksandra V. Shamanina, Arcady M. Ayzenshtadt

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

### ABSTRACT

**Introduction.** Mineral raw materials, mechanically dispersed to a fine-grained condition, contribute to the effective use of the energy potential in the course of the structuring of composite materials. An important parameter, characterizing the dispersion ability and allowing to evaluate the ability of the system to transform is the specific surface of the substance. The experimental value of the specific surface depends on the measurement method and may differ for the same solids when different methods are applied. The purpose of the work is to study the morphological features of the surface of powdered quartz-containing systems having varying degrees of dispersion. The work represents the experimental identification of specific surface.

**Materials and methods.** Filtration and adsorption methods were used to identify the specific surface of a mechanically activated sample of polymineral sand. Fine powders of sand were obtained by dry grinding in a planetary ball mill. The analysis of the obtained results was conducted taking into account the surface tension values of the powders as the characteristics of the surface energy of a surface area unit.

**Results.** It is found that dimensions of the specific surface identified using the gas filtration method are smaller than those obtained using the nitrogen adsorption method. The authors have identified a linear functional dependence between the ratio of dispersion and polarization components of the surface tension and the ratio of specific surfaces obtained using different methods for one sample of sand.

**Conclusions.** Despite a difference in the values obtained for the same material sample, specific surface area indicators, identified using different methods, allow to evaluate the extent of the surface maturity, the availability of active centres, and the energy potential of mineral powders. The ratio of specific surfaces can be used as a criterion for the rational choice of the operating parameters of mechanical activation of quartz-containing powder systems to increase the energy potential of the surface.

**KEYWORDS:** specific surface area, dispersed system, mechanical activation, dispersion, quartz, surface tension, structurization, gas permeability, adsorption

**Acknowledgments.** The study was carried out using the unique research installation "Physicochemistry of the surface of nano-scale dispersed systems" within the framework of State Task 0793-2020-0005.

**FOR CITATION:** Shamanina A.V., Ayzenshtadt A.M. Features of determining the specific surface area of powdered quartz-containing systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(1):42-49. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.42-49 (rus.).

*Corresponding author:* Alexandra V. Shamanina, alexandra.shamanina@yandex.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

При формировании структуры композиционных строительных материалов многие физико-химические процессы, происходящие на границе раздела фаз, определяются поверхностью взаимодействующих систем [1–6]. Основным структурообразующим фактором, позволяющим интенсифицировать такие процессы, является удельная поверхность минеральных компонентов, входящих в состав строительных материалов.

Удельная поверхность устанавливается отношением общей суммы поверхности всех частиц пористого материала к его массе и зависит от формы, размеров и поверхности частиц порошка [7–10]. Экспериментальное определение удельной поверхности дисперсных материалов — один из ключевых этапов оценки активности порошковых систем при трансформационных превращениях, поэтому выбор методики расчета данного показателя служит важным показателем для выявления рациональных областей и эффективности использования минеральных компонентов в составе композиционных строительных смесей [11–16].

Для грубодисперсных сыпучих материалов наиболее распространены методы определения удельной поверхности, основанные на измерении скорости фильтрации газов через анализируемую пробу с известным значением относительной плотности. При этом квадрат удельной поверхности обратно пропорционален скорости протекания фильтрационного процесса [17–19]. С целью установления удельной поверхности тонкодисперсных порошков часто применяются адсорбционные методы, базирующиеся на сорбции твердым телом инертного газа, проходящего через него при криогенной температуре и постепенном повышении давления. Эти методы основаны на определении количества газа, адсорбируемого пористой поверхностью твердых частиц порошка [20–23]. Адсорбционные методы, несмотря на свою трудоемкость, популярны, так как дают более точные результаты. Математическое

описание физической адсорбции инертного газа построено на полимолекулярной теории, предложенной Брунауэром, Эмметом и Теллером (метод БЭТ) [24–27]. Для практической реализации адсорбционного метода широко используются волюметрические анализаторы, устроенные с помощью способа низкотемпературной адсорбции азота.

Фильтрационный метод определения удельной поверхности предусматривает прохождение воздуха через слой порошкового материала при давлении, близком к атмосферному, в режиме «обтекания» потоками газа твердых частиц порошка. При этом не учитывается развитая поверхность частиц, образованная микропорами и дефектами поверхности. Отличие адсорбционного метода заключается в том, что при выявлении удельной поверхности дисперсных систем методом сорбции азота молекулы адсорбата проникают в микропоры и микродефекты частиц, таким образом, в процессе адсорбции участвует большая поверхность анализируемого объекта [28–30].

Результаты определения удельной поверхности анализируемого порошка этими методами могут быть близки только в том случае, если частицы представляют собой упругие тела, обладающие сферической симметрией, что для реальных порошков природного происхождения является исключительным фактом. Однако сопоставление таких результатов позволяет судить о характере агрегации частиц, степени развитости поверхности, наличии активных центров и реакционном потенциале изучаемого порошкового материала. Поэтому цель данной работы — исследование морфологических особенностей поверхности порошковых кварцсодержащих систем, выполненное на основе экспериментального определения удельной поверхности адсорбционным и фильтрационным методами. Анализ экспериментальных результатов проводился с учетом установленных значений поверхностных натяжений рассматриваемых порошков, как характеристики поверхностной энергии единицы площади поверхности дисперсных систем. Удельные

поверхности  $S_{уд}^a$ , а также значения суммарного поверхностного натяжения  $\sigma_s$  и его поляризационной  $\sigma_s^p$  и дисперсионной  $\sigma_s^d$  составляющих (с подробной методикой определения) представлены для анализируемой дисперсной системы в работе [31].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходного сырьевого материала для исследований выбран речной полиминеральный песок месторождения «Краснофлотский-Запад» (г. Архангельск). Опытные порошки исходного песка получены путем сухого механического помола в планетарной шаровой мельнице Retsch PM 100 при скорости вращения ротора 420 об/мин в течение 15, 30, 40, 45 и 60 минут. Перед измельчением сырья доводилось до постоянной массы в сушильном шкафу.

Удельную поверхность полученных тонкодисперсных порошков измеряли методом сорбции азота на анализаторе Autosorb-iQ-MP и методом газопроницаемости Козени – Кармана на установке ПСХ-10а. Измерение истинной плотности исходных песков проводилось пикнометрическим методом.

Для определения поверхностного натяжения из механоактивированных порошков на гидравлическом прессе ПЛГ-20 были изготовлены образцы-запрессовки диаметром 30 мм при воздействии в течение 2 мин фиксированного избыточного усилия 2, 4, 8, 12 и 16 т. Устанавливали поверхностное натяжение методом ОВРК (Оунса – Вендта – Рабеля – Кьельбле). Экспериментальные значения краевого угла смачивания поверхностей образцов-запрессовок рабочими жидкостями с известными поляризационными и дисперсионными составляющими поверхностного натяжения (вода, глицерин, декан) измерены с помощью гониометра DSA-20E (EasyDrop).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные результаты определения удельной поверхности исследуемого порошка кварцсодержащей породы фильтрационным методом  $S_{уд}^f$  являются заниженными в сравнении со значениями, полученными адсорбционным методом  $S_{уд}^a$  (табл. 1). Это

объясняется сложной структурой частиц опытного образца песка, в том числе микропорами и микродефектами, которые, в отличие от адсорбционного метода, не учитываются при установлении удельной поверхности методом фильтрации газа.

Значения удельной поверхности опытных порошков полиминерального песка, полученные при различном времени помола, показали, что увеличение времени механической активации приводит к росту удельной поверхности (табл. 1). Однако при адсорбционном методе измерения для образцов длительности помола более 30 мин происходит резкое снижение величины этого показателя. Данный факт объясняется самопроизвольной агрегацией тонкодисперсных частиц порошка при увеличении длительности диспергирования, происходящей за счет компенсации избыточной поверхностной энергии деформированной кристаллической решетки кварцевого песка и при отсутствии стабилизатора агрегативной устойчивости в дисперсной системе. Следует также отметить, что при увеличении времени помола до 60 мин происходит значительное увеличение  $S_{уд}^a$ . Этот факт может быть связан со сложным минеральным составом рассматриваемого песка (различной размолоспособностью составляющих минералов) и увеличением свободной поверхностной энергии при механической активации сопутствующих минералов, характерных для сырья этого месторождения. Вместе с тем обращает на себя внимание отмеченное аномальное уменьшение величины  $S_{уд}^a$  при 45-минутном помоле. По всей видимости, для данного вида размольного аппарата этот временной режим вызывает процесс активной температурной (порядка 80–90 °С) конгломерации кремнийсодержащего сырья и коагуляции микропор частицами минералов, характеризующихся высокой размолоспособностью (этот эффект не оказывает влияние на результаты определения фильтрационным методом).

Результаты экспериментальных значений поверхностного натяжения  $\sigma_s$  исследуемого полиминерального песка, а также его поляризационной  $\sigma_s^p$  и дисперсионной  $\sigma_s^d$  составляющих (табл. 2) показали, что поляризационная составляющая поверхностного натяжения для всех фракций тонкоди-

**Табл. 1.** Удельная поверхность порошков полиминерального песка при различной продолжительности ( $t$ ) механоактивации

**Table 1.** Specific surface area of polymineral sand powders at different durations ( $t$ ) of mechanical activation

$t$ , мин $t$ , min	$S_{уд}^a$ , м <sup>2</sup> /кг $S_{sp}^a$ , м <sup>2</sup> /kg	$S_{уд}^f$ , м <sup>2</sup> /кг $S_{sp}^f$ , м <sup>2</sup> /kg	$S_{уд}^a/S_{уд}^f$ $S_{sp}^a/S_{sp}^f$
15	700	205	3,41
30	950	370	2,57
40	890	400	2,23
45	795	450	1,77
60	1335	685	1,95

**Табл. 2.** Поверхностное натяжение и его составляющие при различной продолжительности  $t$  механоактивации

**Table 1.** Surface tension and its components at different durations  $t$  of mechanical activation

$t$ , мин $t$ , min	$\sigma_s^d$ , М <sup>2</sup> /кг $\sigma_s^d$ , m <sup>2</sup> /kg	$\sigma_s^p$ , М <sup>2</sup> /кг $\sigma_s^p$ , m <sup>2</sup> /kg	$\sigma_s$ , МДж/М <sup>2</sup> $\sigma_s$ , МДж/М <sup>2</sup>
15	21,58	47,65	69,22
30	21,63	47,48	69,12
40	21,71	47,62	69,32
45	21,85	48,32	70,17
60	22,11	48,40	70,51

сперсного порошка, которая выявляется наличием активных центров поверхности, преобладает над дисперсионной составляющей, определяемой ван-дер-ваальсовым взаимодействием частиц. Таким образом, доминирующим фактором в проявлении поверхностной активности при трансформационных превращениях исследуемой дисперсной системы является наличие активных центров.

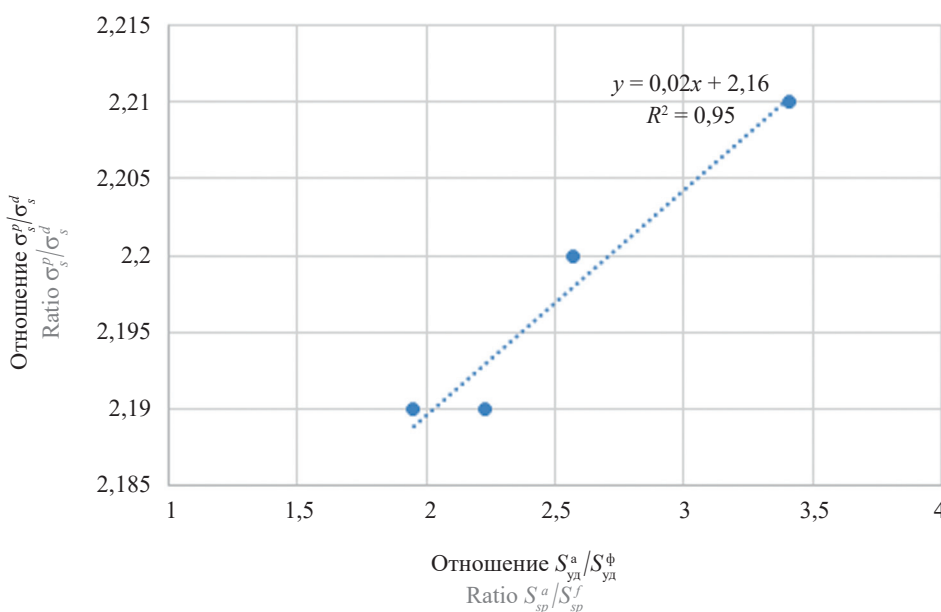
Корреляционный анализ отношения удельных поверхностей  $S_{уд}^a/S_{уд}^f$  (табл. 1) к поверхностному натяжению  $\sigma_s$  при различной продолжительности механоактивации показал наличие высокой (по шкале Чеддока) обратной линейной зависимости (линейный коэффициент корреляции Пирсона  $r = -0,72$ ). Увеличение времени диспергирования исследуемого полиминерального песка сопровождается уменьшением отношения  $S_{уд}^a/S_{уд}^f$  и увеличением как поляризационной, так и дисперсионной составляющих поверхностного натяжения. Кроме того, установлена линейная функциональная зависимость вида

$\frac{\sigma_s^p}{\sigma_s^d} = f \frac{S_{уд}^a}{S_{уд}^f}$  (полученная по вышеуказанной причине без экспериментального значения удельной поверхности при 45-минутном помоле) (рис.).

Данная зависимость подчиняется следующему математическому выражению (коэффициент достоверности аппроксимации 0,95):

$$\sigma_s^p/\sigma_s^d = 0,02S_{уд}^a/S_{уд}^f + 2,16. \tag{1}$$

Интересен вероятный физический смысл свободного члена уравнения (1). Так, при равенстве  $S_{уд}^a = S_{уд}^f$  (это возможно, например, для грубодисперсной системы) отношение  $\sigma_s^p/\sigma_s^d = 2,18$ . Равенство удельных поверхностей, определенных методами адсорбции и фильтрации, предполагает морфологическое строение частиц порошков в виде упругих шаров. Однако даже в этом случае для исследуемой дисперсной системы  $\sigma_s^p \approx 2\sigma_s^d$ . Это, на наш взгляд, означает, что для порошков, приготовленных из рассматриваемого полимине-



Линейная функциональная зависимость вида  $\frac{\sigma_s^p}{\sigma_s^d} = f \frac{S_{уд}^a}{S_{уд}^f}$

Linear functional dependence represented as:  $\frac{\sigma_s^p}{\sigma_s^d} = f \frac{S_{sp}^a}{S_{sp}^f}$

рального песка, поляризационные эффекты, связанные с реакционными центрами поверхности, преобладают над дисперсионными, обуславливаемыми силами Ван-дер-Ваальса. Следовательно, свободный член уравнения (1) характеризует возможный механизм поверхностных явлений в исследуемой дисперсной системе.

Таким образом, отношение удельных поверхностей, определенных адсорбционным и фильтрационным методами, может быть использовано в качестве критерия рационального выбора режимных параметров механического диспергирования кварцсодержащих систем с целью получения наиболее развитой поверхности с учетом значений ее энергетического потенциала.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что значения удельной поверхности, полученные фильтрационным методом для полиминерального песка месторождения «Краснофлотский-Запад», являются заниженными по отношению к значениям, полученным методом адсорбции азота. Это объясняется сложной структурой поверхности частиц исследуемого песка, которая не учитывается в полной мере при определении удельной поверхности фильтрационным методом. Отношение значений удельных поверхностей, полученных разными методами для одной пробы песка, может быть использовано в качестве критерия, характеризующего реакционную способность порошков данного песка разной степени дисперсности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ролдунгин В.И. Физикохимия поверхности. Долгопрудный : Интеллект, 2008. 565 с.
2. Сумм Б.Д. Основы коллоидной химии. М. : Академия, 2007. 240 с.
3. Cavarretta C., Coop R., O'Sullivan M. The influence of particle characteristics on the behaviour of coarse grained soils // *Géotechnique*. 2021. Vol. 60. Issue 6. Pp. 413–423. DOI: 10.1680/geot.2010.60.6.413
4. Guvalov A.A., Abbasova S.I. Effect of organic and fine disperser additions on rheological properties of mineral suspensions // *Chemical Problems*. 2020. Vol. 18. Issue 4. Pp. 469–476. DOI: 10.32737/2221-8688-2020-4-469-476
5. Westerholm M., Lagerblad B., Silfwerbrand J., Forssberg E. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars // *Cement and Concrete Composites*. 2008. Vol. 30. Issue 4. Pp. 274–282. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2007.08.008
6. Xing B., Fan W., Lyu Y., Sun H., Che J. Influence of particle mineralogy and size on the morphological characteristics of mineral fillers // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 15. Pp. 3995–4009. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.10.026
7. Айзенштадт А.М., Лесовик В.С., Фролова М.А., Тутыгин А.С. Элементы физикохимии поверхности высокодисперсных систем. Архангельск : САФУ, 2015. 145 с.
8. Gupta V.K. Effect of size distribution of the particulate material on the specific breakage rate of particles in dry ball milling // *Powder Technology*. 2016. Vol. 305. Pp. 714–722. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.10.075
9. Bai S., Guan X., Li H., Ou J. Effect of the specific surface area of nano-silica particle on the properties of cement paste // *Powder Technology*. 2021. Vol. 392. Pp. 680–689. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.07.045
10. Meloni P., Carcangiu G., Delogu F. Specific surface area and chemical reactivity of quartz powders during mechanical processing // *Materials Research Bulletin*. 2012. Vol. 47. Issue 1. Pp. 146–151. DOI: 10.1016/j.materresbull.2011.09.014
11. Шаманина А.В., Кононова В.М., Данилов В.Е., Фролова М.А., Айзенштадт А.М. Аспекты определения активности поверхности дисперсных систем на основе минеральных порошков // *Материаловедение*. 2021. № 7. С. 30–36. DOI: 10.31044/1684-579X-2021-0-7-30-36
12. Морозова М.В., Акулова М.В., Фролова М.А., Щепочкина Ю.А. Определение энергетических параметров песков на примере месторождений Архангельской области // *Материаловедение*. 2020. № 9. С. 45–48. DOI: 10.31044/1684-579X-2020-0-9-45-48
13. Вешнякова Л.А., Дроздук Т.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А., Тутыгин А.С. Поверхностная активность кремнесодержащих горных пород // *Материаловедение*. 2016. № 5. С. 45–48.
14. Wang T., Ishida T., Gu R.C. A comparison of the specific surface area of fly ash measured by image analysis with conventional methods // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190. Pp. 1163–1172. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.131
15. Yao G., Cui T., Zhang J., Wang J., Lyu X. Effects of mechanical grinding on pozzolanic activity and hydration properties of quartz // *Advanced Powder Technology*. 2020. Vol. 31. Issue 11. Pp. 4500–4509. DOI: 10.1016/j.apt.2020.09.028
16. Sepuritis R., Wigum B.J., Garboczi E.J., Mørtzell E., Jacobsen S. Filler from crushed aggregate for concrete: Pore structure, specific surface, particle shape and size distribution // *Cement & Concrete Composites*, 2014. Vol. 54. Pp. 2–16. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.03.010
17. Ходаков Г.С. Метод измерения удельной поверхности высокодисперсных порошков по фильтрации газа // *Коллоидный журнал*. 1995. Т. 57. № 2. С. 280–282.
18. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М. : Мир, 1984. 306 с.
19. Ходаков Г.С. Основные методы дисперсионного анализа порошков. М. : Стройиздат, 1968. 200 с.

20. Вячеславов А.С., Ефремова М.И. Определение площади поверхности и пористости материалов методом сорбции газов: метод. разработка. М. : МГУ, 2011. 65 с.

21. Носенко А.А., Половнева С.И. Методы и устройства для измерения удельной поверхности дисперсных материалов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 7. № 2 (21). С. 113–121. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-113-121

22. Карнаухов А.П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. Новосибирск : Наука. Сиб. предприятие РАН, 1999. 470 с.

23. Guzzo P.L., Marinho de Barros F.B., Soares B.R., Santos J.B. Evaluation of particle size reduction and agglomeration in dry grinding of natural quartz in a planetary ball mill // Powder Technology. 2020. Vol. 368. Pp. 149–159. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.04.052

24. Naderi M. Surface area // Progress in Filtration and Separation. 2015. Pp. 585–608. DOI: 10.1016/B978-0-12-384746-1.00014-8

25. Bardestani R., Patience G., Kaliaguine S. Experimental methods in chemical engineering: specific surface area and pore size distribution measurements — BET, BJH, and DFT // The Canadian Jour-

nal of Chemical Engineering. 2019. Vol. 97. Issue 11. Pp. 2781–2791. DOI: 10.1002/cjce.23632

26. Anovitz L.M., Cole D.R. Characterization and analysis of porosity and pore structures // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2015. Vol. 80. Issue 1. Pp. 61–164. DOI: 10.2138/rmg.2015.80.04

27. Gibson N., Kuchenbecker P., Rasmussen K., Hodoroaba V., Rauscher H. Volume-specific surface area by gas adsorption analysis with the BET method // Characterization of Nanoparticles, 2020. Pp. 265–294. DOI: 10.1016/B978-0-12-814182-3.00017-1

28. Адамсон А.С., Артур У. Физическая химия поверхностей : пер. с англ. / под ред. З.М. Зорина, В.М. Муллера. М. : Мир, 1979. 568 с.

29. Волков В.А. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы : учебник. 2-е изд., испр. СПб. : Лань, 2015. 672 с.

30. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы : учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Химия, 1988. 464 с.

31. Шаманина А.В., Айзенштадт А.М., Кононова В.М., Данилов В.Е. Оценка эффективности механической активации кремнеземсодержащих горных пород // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 19–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-19-27

Поступила в редакцию 16 декабря 2021 г.

Принята в доработанном виде 27 декабря 2021 г.

Одобрена для публикации 29 декабря 2021 г.

ОБ АВТОРАХ: **Александра Валерьевна Шаманина** — аспирант кафедры композиционных материалов и строительной экологии; **Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ имени М.В. Ломоносова)**; 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; РИНЦ ID: 1045127, Scopus: 57284203500, ResearcherID: ABF-8872-2021, ORCID: 0000-0003-1084-4349; alexandra.shamanina@yandex.ru;

**Аркадий Михайлович Айзенштадт** — доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой композиционных материалов и строительной экологии; **Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова (САФУ имени М.В. Ломоносова)**; 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; РИНЦ ID: 13187, Scopus: 6507396764, ResearcherID: F-5339-2017, ORCID: 0000-0003-2904-2549; a.isenshtadt@narfu.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

- Roldungin V.I. *Physical chemistry of the surface*. Dolgoprudnyy, Intellekt, 2008; 565. (rus.).
- Summ B.D. *Fundamentals of colloidal chemistry*. Moscow, Akademiya, 2007; 240. (rus.).
- Cavarretta C., Coop R., O'Sullivan M. The influence of particle characteristics on the behaviour of coarse grained soils. *Géotechnique*. 2021; 60(6):413–423. DOI: 10.1680/geot.2010.60.6.413
- Guvalov A.A., Abbasova S.Ī. Effect of organic and fine disperser additions on rheological properties of mineral suspensions. *Chemical Problems*. 2020; 18(4):469–476. DOI: 10.32737/2221-8688-2020-4-469-476
- Westerholm M., Lagerblad B., Silfwerbrand J., Forssberg E. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement and Concrete Composites*. 2008; 30(4):274–282. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2007.08.008
- Xing B., Fan W., Lyu Y., Sun H., Che J. Influence of particle mineralogy and size on the morphological characteristics of mineral fillers. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021; 15:3995–4009. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.10.026
- Ayzenshtadt A.M., Lesovik V.S., Frolova M.A., Tutygin A.S. *Elements of the physicochemistry*

of the surface of highly dispersed systems. Arkhangelsk, NArFU, 2015; 145. (rus.).

8. Gupta V.K. Effect of size distribution of the particulate material on the specific breakage rate of particles in dry ball milling. *Powder Technology*. 2016; 305:714-722. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.10.075

9. Bai S., Guan X., Li H., Ou J. Effect of the specific surface area of nano-silica particle on the properties of cement paste. *Powder Technology*. 2021; 392:680-689. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.07.045

10. Meloni P., Carcangiu G., Delogu F. Specific surface area and chemical reactivity of quartz powders during mechanical processing. *Materials Research Bulletin*. 2012; 47(1):146-151. DOI: 10.1016/j.materresbull.2011.09.014

11. Shamanina A.V., Kononova V.M., Danilov V.E., Frolova M.A., Ayzenshtadt A.M. Determination aspects of surface activity of dispersed systems based on mineral powders. *Materials Science*. 2021; 2021(7):30-36. DOI: 10.31044/1684-579X-2021-0-7-30-36 (rus.).

12. Morozova M.V., Akulova M.V., Frolova M.A., Shchepochkina Yu.A. Determination of energy sand parameters on example of deposits of Arkhangelsk region. *Materials Science*. 2020; 2020(9):45-48. DOI: 10.31044/1684-579X-2020-0-9-45-48 (rus.).

13. Veshnyakova L.A., Drozdyuk T.A., Ayzenshtadt A.M., Frolova M.A., Tutygin A.S. Surface activity of siliceous rocks. *Materials Science*. 2016; 5:45-48. (rus.).

14. Wang T., Ishida T., Gu R.C. A comparison of the specific surface area of fly ash measured by image analysis with conventional methods. *Construction and Building Materials*. 2018; 190:1163-1172. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.131

15. Yao G., Cui T., Zhang J., Wang J., Lyu X. Effects of mechanical grinding on pozzolanic activity and hydration properties of quartz. *Advanced Powder Technology*. 2020; 31(11):4500-4509. DOI: 10.1016/j.appt.2020.09.028

16. Cepuritis R., Wigum B.J., Garboczi E.J., Mørtzell E., Jacobsen S. Filler from crushed aggregate for concrete: Pore structure, specific surface, particle shape and size distribution. *Cement & Concrete Composites*. 2014; 54:2-16. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.03.010

17. Khodakov G.S. Method of measuring the specific surface of highly dispersed powders by gas filtration. *Colloidal Journal*. 1995; 57(2):280-282. (rus.).

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

19. Khodakov G.S. *Basic methods of dispersion analysis of powders*. Moscow, Stroyizdat, 1968; 200. (rus.).

20. Vyacheslavov A.S., Yefremova M.I. *Determination of the surface area and porosity of materials by gas sorption: methodological development*. Moscow, MGU, 2011; 65. (rus.).

21. Nosenko A.A., Polovneva S.I. Methods and devices for measuring surface area dispersed materials. *News of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020; 7(21):113-121. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-113-121 (rus.).

22. Karnaukhov A.P. *Adsorption. The texture of dispersed and porous materials*. Novosibirsk, The science. Siberian enterprise of the Russian Academy of Sciences, 1999; 470. (rus.).

23. Guzzo P.L., Marinho de Barros F.B., Soares B.R., Santos J.B. Evaluation of particle size reduction and agglomeration in dry grinding of natural quartz in a planetary ball mill. *Powder Technology*. 2020; 368:149-159. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.04.052

24. Naderi M. Surface area. *Progress in Filtration and Separation*. 2015; 585-608. DOI: 10.1016/B978-0-12-384746-1.00014-8

25. Bardestani R., Patience G., Kaliaguine S. Experimental methods in chemical engineering: specific surface area and pore size distribution measurements — BET, BJH, and DFT. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2019; 97(11):2781-2791. DOI: 10.1002/cjce.23632

26. Anovitz L.M., Cole D.R. Characterization and analysis of porosity and pore structures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2015; 80(1):61-164. DOI: 10.2138/rmg.2015.80.04

27. Gibson N., Kuchenbecker P., Rasmussen K., Hodoroaba V., Rauscher H. Volume-specific surface area by gas adsorption analysis with the BET method. *Characterization of Nanoparticles*. 2020; 2020:265-294. DOI: 10.1016/B978-0-12-814182-3.00017-1

28. Adamson A.S., Artur U. *Physical chemistry of surfaces. translated from English edited by Z.M. Zorin, V. M. Muller*. Moscow, Mir, 1979; 568. (rus.).

29. Volkov V.A. *Colloidal chemistry. Surface phenomena and dispersed systems: textbook. 2nd edition*. St. Petersburg, Lan', 2015; 672. (rus.).

30. Frolov Yu.G. *Colloidal chemistry course. Surface phenomena and dispersed systems: textbook for universities. 2nd edition*. Moscow, Chemistry, 1988; 464. (rus.).

31. Shamanina A., Ayzenshtadt A., Kononova V., Danilov V. Estimation of the efficiency of mechanical activation of silica-containing rocks. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021; 6(5):19-27. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-19-27 (rus.).

Received December 16, 2021.

Adopted in revised form on December 27, 2021.

Approved for publication on December 29, 2021

**BIONOTES: Aleksandra V. Shamanina** — postgraduate student of the Department of Composite Materials and Building Ecology; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)**; 17 Northern Dvina embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; ID RISC: 1045127, Scopus: 57284203500, ResearcherID: ABF-8872-2021, ORCID: 0000-0003-1084-4349; alexandra.shamanina@yandex.ru;

**Arcady M. Ayzenshtadt** — Doctor of Chemistry, Professor, Head of the Department of Composite Materials and Building Ecology; **Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NArFU)**; 17 Northern Dvina embankment, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; ID RISC: 13187, Scopus: 6507396764, ResearcherID: F-5339-2017, ORCID: 0000-0003-2904-2549; a.isenshtadt@narfu.ru.

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

*The authors declare no conflicts of interest.*

## Влияние пен различной кратности на формирование структуры теплоизоляционного пенобетона

Ольга Владимировна Винокурова<sup>1</sup>, Альбина Алексеевна Баранова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ангарское управление строительства; г. Ангарск, Россия;

<sup>2</sup>Ангарский государственный технический университет (АнГТУ); г. Ангарск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассмотрено влияние пен различной природы и кратности на формирование структуры теплоизоляционного пенобетона. Исследование направлено на решение вопроса обеспечения условий гидратации вяжущего компонента в межпоровом пространстве пенобетонной смеси с сохранением ее устойчивости. Цель исследования — проектирование экономически целесообразного состава.

**Материалы и методы.** Для анализа процесса формирования структуры изготавливались образцы пенобетона марок по средней плотности D300 и D500 на рядовом портландцементе. В качестве переменных факторов, определяющих параметры структуры материала, были приняты: природа поверхностно-активной основы пены, ее кратность и водоцементное отношение раствора. Условия гидратации цемента оценивались прочностью пенобетона. Прочность устанавливалась согласно ГОСТ 10180. Измерение параметров макроструктуры производилось с помощью оптического микроскопа Levenhuk и программного обеспечения LevenhukLite.

**Результаты.** Установлено, что гидратация в межпоровом пространстве смеси реализуется наиболее полно при использовании белкового пенообразователя с низкой кратностью пены. Пенобетон на его основе имеет замкнутые поры, диаметр которых колеблется в узком диапазоне значений, а толщина перегородки превышает максимальный размер цементного зерна. Увеличение кратности пены и низкое значение водоцементного отношения раствора приводят к неравномерному распределению воздуха в смеси и снижению толщины межпоровой перегородки. При этом структура пенобетона «рыхлая», представляет собой конгломераты сообщающихся пор.

**Выводы.** Поскольку геометрия макроструктуры материала оказывает существенное влияние на процесс теплопередачи и прочность, для изготовления теплоизоляционного пенобетона на рядовом портландцементе без домола предпочтителен белковый пенообразователь с низкой кратностью пены. В противном случае повышение кратности пены требует увеличения удельной поверхности вяжущего компонента.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пенобетон, пенообразователь, кратность пены, структура, водоцементное отношение, диаметр пор, толщина перегородки

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Винокурова О.В., Баранова А.А. Влияние пен различной кратности на формирование структуры теплоизоляционного пенобетона // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 1. С. 50–59. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.50-59

Автор, ответственный за переписку: Ольга Владимировна Винокурова, neitrino.78@mail.ru.

## The influence of foams, having different expansion ratios, on the structurization of thermal insulation foam concrete

Ol'ga V. Vinokurova<sup>1</sup>, Albina A. Baranova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Angarsk Management of Construction; Angarsk, Russian Federation;

<sup>2</sup>Angarsk State Technical University (ASTU); Angarsk, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The article addresses the influence of foams, having different origins and expansion ratios, on the structurization of thermal insulation foam concrete. The study is focused on solving the problem of the binder hydration conditions in the interpore space of the foam concrete mixture and maintaining its stability. The goal is to design an economically effective composition.

**Materials and methods.** To analyze the structurization process, foam concrete samples, featuring average density grades D300 and D500, were made using ordinary Portland cement. The nature of the surfactant substance of the foam, its expansion ratio and the water-cement ratio of the solution are the variable factors determining parameters of the material structure. The strength of the foam concrete was used to evaluate the cement hydration conditions. The strength was identified according to GOST 10180. Parameters of the macrostructure were measured using the Levenhuk optical microscope and the LevenhukLite software.

**Results.** It is found that hydration in the interpore space of the mixture is implemented to the fullest extent when a protein foaming agent, featuring a low foam expansion ratio, is used. The foam concrete, thus made, has closed pores, whose diameter varies in a small range of values, while the partition thickness exceeds the maximum size of the cement grain. An

increase in the foam expansion ratio and a low value of the water-cement ratio of the solution lead to the uneven distribution of air in the mixture and reduce the thickness of the inter pore partition. In this case, the structure of the foam concrete is "friable"; it represents conglomerates of interconnected pores.

**Conclusions.** Since the geometry of the macrostructure of the material has a significant influence on the heat transfer process and strength, the protein foaming agent, featuring a low foam expansion ratio, is preferable for the production of thermal insulation foam concrete using standard Portland cement without re-grinding. Otherwise, a higher foam expansion ratio foam requires an increase in the specific surface area of the binder.

**KEYWORDS:** foam concrete, foaming agent, foam expansion ratio, structure, water-cement ratio, pore diameter, partition thickness

**FOR CITATION:** Vinokurova O.V., Baranova A.A. The influence of foams, having different expansion ratios, on the structurization of thermal insulation foam concrete. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(1):50-59. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.50-59 (rus.).

*Corresponding author:* Ol'ga V. Vinokurova, neitrino.78@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Одними из ключевых направлений экономического и технологического развития являются энергетическая эффективность и энергосбережение. С целью снижения топливно-энергетических затрат в области строительных материалов в ГОСТ 25485-2019 внедрена марка ячеистого бетона по средней плотности D200.

Вместе с тем производство пенобетона пониженной плотности имеет этапы, которые на сегодняшний день требуют научной проработки, например — процесс совмещения пены с раствором [1].

Причина — в двойственной природе молекул поверхностно-активных веществ (ПАВ): они способствуют образованию пор, но негативно сказываются на гидратации цемента.

Усугубляет положение, приводя к снижению устойчивости пенобетонной смеси, ограниченное количество твердых компонентов смеси, с одной стороны, и потребность в значительном расходе воды, с другой [2].

Адсорбция молекул пенообразователя на зернах цемента [3] снижает заложенный в вяжущий компонент потенциал. Устранить ее помогает увеличение удельной поверхности цемента за счет домолла, но злоупотребление этой процедурой приводит к дополнительным затратам энергии [4–6] и к преждевременному износу мелющего оборудования.

Поэтому при изготовлении теплоизоляционного пенобетона важно обеспечить еще на проектном этапе соотношение размеров зерна цемента и межпоровой перегородки, которые, как показывают опыты, в свою очередь, зависят от размеров ячейки и кратности пены.

Необходимость подбора пенообразователя и кратности пены с учетом размера зерна цемента связана не только с увеличением прочности пенобетона, но и в большей мере со снижением энергоемкости его производства.

На начальном этапе работы авторы определили характер распределения структурообразующих компонентов и воздуха в пенобетонной смеси при использовании пен различной кратности на основе опытных данных. Далее в ходе исследования предприятия попытались обосновать полученные результа-

ты физико-химическими законами и на их основе вывести практические рекомендации.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использовали следующие материалы: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н АО «Ангарскцемент» и два типа пенообразователя: белковый Biofoam, синтетический «Пентапав-430».

С применением вышеуказанных материалов произвели замесы для получения пенобетонов марок по плотности D300 и D500 из цементных растворов с различным водоцементным отношением  $(В/Ц)_p$  и пен определенной кратности.

Влияние кратности пены на формирование структуры оценивали значениями прочности при сжатии пенобетона. Прочность образцов определялась в соответствии с ГОСТ 10180. Характер распределения материала (твердой фазы) и воздуха в пенобетоне устанавливали с помощью микроскопа Levenhuk LabZZ M4 и программного обеспечения LevenhukLite 4.11. Размер ячеек и перегородок измеряли по срезу материала, выбирая поры с глубиной, близкой к их радиусу. Из 300 значений, полученных при измерении диаметра пор  $d$  и толщины перегородки  $t$ , вычисляли: среднюю, максимальную и минимальную величину, среднее квадратическое отклонение  $\sigma_d$ ,  $\sigma_t$  и коэффициент вариации  $C_v^d$ ,  $C_v^t$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Составы и результаты испытаний образцов пенобетона марок по плотности D300 и D500 на белковом пенообразователе Biofoam сведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Прочность пенобетона марки по плотности D300 на белковом пенообразователе повышается с увеличением количества воды в смеси. При  $В/Ц$  более 0,7 наблюдается потеря ее устойчивости. В пенобетоне марки по плотности D500 рост прочности происходит до определенного значения  $В/Ц = 0,63$ . Дальнейшее увеличение количества воды почти не оказывает влияние на прочностную характеристику.

Рецептура и результаты испытаний пенобетонов марок по средней плотности D300 и D500 на синтетическом пенообразователе «Пентапав-430» представлены в табл. 3 и 4 соответственно.

**Табл. 1.** Результаты испытаний пенобетона марки по средней плотности D300 на белковом пенообразователе Biofoam  
**Table 1.** The testing results of the foam concrete, having the D300 average density grade, and made using the Biofoam protein foaming agent

Состав на 1 м <sup>3</sup> пенобетонной смеси, кг Composition per 1 m <sup>3</sup> of foam concrete mixture, kg				Распływ раствора по Суттарду, см The Suttard flow spread of the concrete solution, cm	В/Ц смеси W/C of the mixture	Прочность при сжатии, МПа Compressive strength, МPa	Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup> Average density in the dry condition, kg/m <sup>3</sup>
Пена Foam		Раствор смеси Matrix					
ПАВ Surfactants	Вода Water	Цемент Cement	(В/Ц) <sub>p</sub> (W/C) <sub>m</sub>				
При кратности пены 10 (концентрация раствора пены 9 %) With a foam multiplicity of 10 (foam solution concentration of 9 %)							
5,9	59	245	0,33	6	0,59	0,366	270
6,2	62	245	0,36	6	0,64	0,529	296
5,7	57	245	0,39	7	0,65	0,763	274
6,3	63	245	0,42	9	0,70	0,783	270
4,9	49	245	0,60	22	0,82	Осадка смеси Mixture settling	

**Табл. 2.** Результаты испытаний пенобетона марки по средней плотности D500 на белковом пенообразователе Biofoam  
**Table 2.** The testing results of the foam concrete, having the D500 average density grade, and made using the Biofoam protein foaming agent

Состав на 1 м <sup>3</sup> пенобетонной смеси, кг Composition per 1 m <sup>3</sup> of foam concrete mixture, kg				Распływ раствора по Суттарду, см The Suttard flow spread of the concrete solution, cm	В/Ц смеси W/C of the mixture	Прочность при сжатии, МПа Compressive strength, МPa	Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup> Average density in the dry condition, kg/m <sup>3</sup>
Пена Foam		Раствор смеси Matrix					
ПАВ Surfactants	Вода Water	Цемент Cement	(В/Ц) <sub>p</sub> (W/C) <sub>m</sub>				
При кратности пены 10 (концентрация раствора пены 9 %) If the foam expansion ratio is 10 (the foam solution concentration is 9 %)							
6,1	61	440	0,38	7	0,53	2,36	455
5,7	57	440	0,41	8	0,55	2,61	478
5,70	57	440	0,44	11	0,58	2,92	512
5,3	53	440	0,5	14	0,63	2,95	499
4,17	42	440	0,56	20	0,66	2,8	512
4,7	47	440	0,62	25	0,74	2,9	489

**Табл. 3.** Результаты испытаний пенобетона марки по средней плотности D300 на синтетическом пенообразователе «Пентапав-430»

**Table 3.** Testing results of the average density D300 foam concrete made using synthetic foaming agent Pentapav-430

Состав на 1 м <sup>3</sup> пенобетонной смеси, кг Composition per 1 m <sup>3</sup> of foam concrete mixture, kg				Распływ раствора по Суттарду, см The Suttard flow spread of the concrete solution, cm	В/Ц смеси W/C of the mixture	Прочность при сжатии, МПа Compressive strength, MPa	Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup> Average density in the dry condition, kg/m <sup>3</sup>
Пена Foam		Раствор смеси Matrix					
ПАВ Surfactants	Вода Water	Цемент Cement	(В/Ц) <sub>р</sub> (W/C) <sub>м</sub>				
При кратности пены 33 (концентрация раствора пены 9 %) If the foam expansion ratio is 33 (the foam solution concentration is 9 %)							
1,30	13,0	265	0,6	22	0,65	0,06	271
1,20	12,0	265	0,66	30	0,71	0,372	293
1,01	10,1	265	0,72	33	0,76	0,477	311
1,03	10,3	265	0,78	38	0,82	0,490	298
0,86	8,6	265	0,84	41	0,87	0,492	307
0,87	8,7	265	0,9	43	0,94	0,512	313
При кратности пены 15 (концентрация раствора пены 1 %) If the foam expansion ratio is 15 (the foam solution concentration is 1 %)							
0,48	43,2	265	0,54	20	0,70	0,379	283
0,53	47,7	265	0,6	22	0,78	0,415	289
0,41	36,9	265	0,66	30	0,80	0,563	301
0,39	35,1	265	0,72	33	0,85	0,473	299
0,33	30	265	0,78	38	0,89	0,493	313

**Табл. 4.** Результаты испытаний пенобетона марки по средней плотности D500 на синтетическом пенообразователе «Пентапав-430»

**Table 4.** Testing results of the average density D500 foam concrete made using synthetic foaming agent Pentapav-430

Состав на 1 м <sup>3</sup> пенобетонной смеси, кг Composition per 1 m <sup>3</sup> of foam concrete mixture, kg				Распływ раствора по Суттарду, см The Suttard flow spread of the concrete solution, cm	В/Ц смеси W/C of the mixture	Прочность при сжатии, МПа Compressive strength, MPa	Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup> Average density in the dry condition, kg/m <sup>3</sup>
Пена Foam		Раствор смеси Matrix					
ПАВ Surfactants	Вода Water	Цемент Cement	(В/Ц) <sub>р</sub> (W/C) <sub>м</sub>				
При кратности пены 31 (концентрация раствора пены 3 %) If the foam expansion ratio is 31 (the foam solution concentration is 3 %)							
0,61	18,3	440	0,5	16	0,54	0,444	475
0,58	17,4	440	0,56	22	0,6	1,29	496
0,61	18,3	440	0,62	32	0,66	1,47	476
При кратности пены 16 (концентрация раствора 1,4 %) If the foam expansion ratio is 16 (the foam solution concentration is 1.4 %)							
0,55	38,5	440	0,5	16	0,59	1,57	506
0,54	37,8	440	0,56	22	0,65	1,44	508
0,56	39,2	440	0,62	32	0,71	1,65	518

В пенобетоне на синтетическом пенообразователе рост прочности с повышением количества воды в смеси наблюдается только при использовании пены кратностью 33. При уменьшении кратности пены тенденция зависимости прочности от В/Ц та же, что и в пенобетоне марки D500 на белковом пенообразователе: повышение прочности с увеличением количества воды в смеси происходит до определенного значения, после которого наблюдается плато, либо незначительное снижение.

В пенобетонной смеси протекают процессы, связанные с диффузионным переносом воздуха и выравниванием давления в порах<sup>1</sup> [7].

С уменьшением средней плотности материала диаметр пор увеличивается [8, 9], а при объеме воздуха более 75–80 % ячейки трансформируются в многогранники [10].

Таким образом, перераспределение раствора и воздуха в смеси происходит в зависимости от их количества в ней.

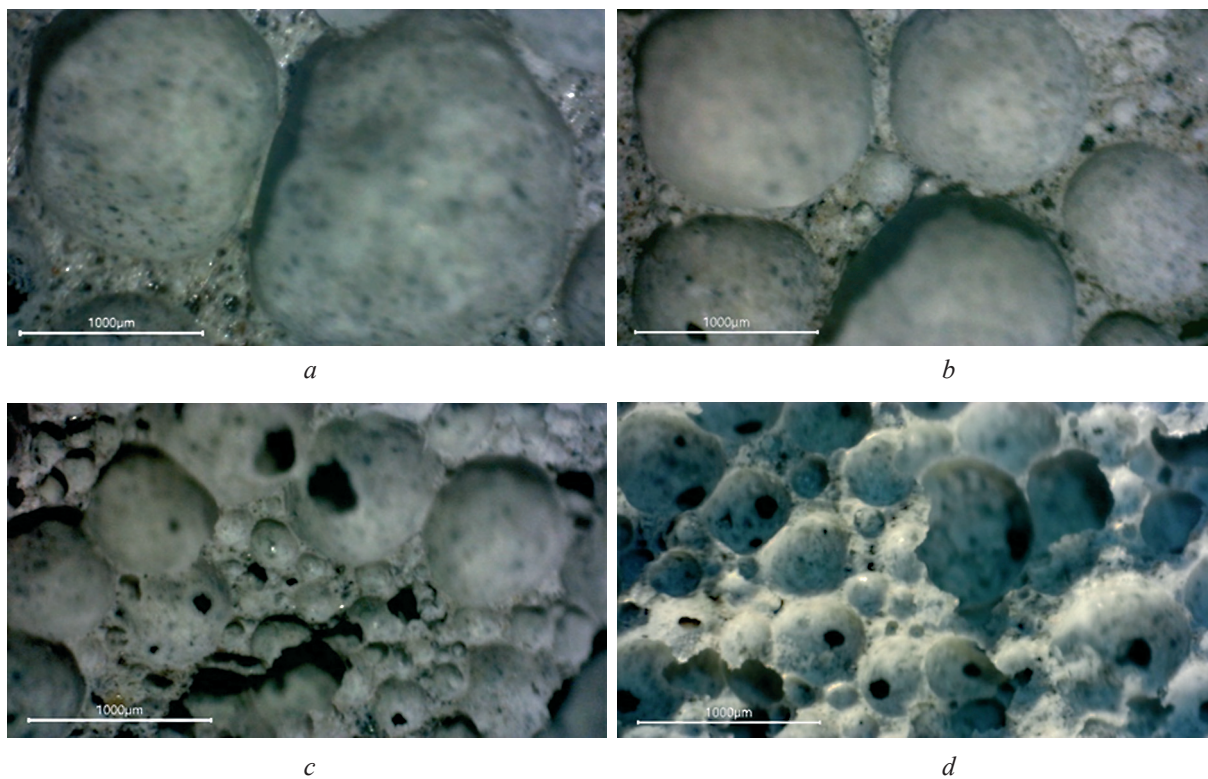
Увеличение размера пор и их последующая трансформация в связи с изменением плотности пенобетона на пенообразователях Biofoam и «Пентапав-430» представлены на рис. 1. Как видно на фото-

графиях, поры в пенобетоне на белковом пенообразователе замкнуты и по размеру значительно больше (рис. 1 *a, b*), чем ячейки пенобетона на основе «Пентапав-430» (рис. 1 *c, d*).

Удвоение радиуса шара уменьшает соотношение площади его поверхности к объему вдвое. В связи с чем при постоянной толщине перегородки с увеличением диаметра пор, объем раствора, необходимый для заполнения межпорового пространства, будет снижаться и, наоборот, с уменьшением диаметра пор объема раствора потребуются больше.

При этом объем раствора для заполнения межпорового пространства в пенобетоне ограничен его заданной средней плотностью и граничным значением  $(В/Ц)_p$ , за пределом которого цементная суспензия разбавлена и не твердеет [11]. Поэтому в пенобетоне на синтетическом пенообразователе при повышении кратности пены увеличивается В/Ц, соответствующее максимальной прочности.

Повышение количества воды в смеси увеличивает объем цементного раствора и снижает степень адсорбции молекул пенообразователя на зернах вяжущего компонента. Наличие плато и незначительное снижение прочности при увеличении В/Ц объясняется тем, что вклад воды в качество структуры нивелирует негативное вли-



**Рис. 1.** Фотография структуры пенобетона марки по средней плотности: *a* — D300 на белковом пенообразователе; *b* — D500 на белковом пенообразователе; *c* — D300 на синтетическом пенообразователе; *d* — D500 на синтетическом пенообразователе

**Fig. 1.** Photograph of the structure of foam concrete of the grade by average density: *a* — D300 on a protein foaming agent; *b* — D500 on a protein foaming agent; *c* — D300 on a synthetic foaming agent; *d* — D500 on a synthetic foaming agent

яние микропор и капилляров цементного камня на прочность каркаса.

Среднее значение пор в пенобетоне на синтетическом пенообразователе марки по плотности D300 и D500 не меняется и составляет 0,356 мм (табл. 5). Вместе с тем увеличивается коэффициент вариации диаметра пор с 0,43 до 0,68–0,94, и расширяется граница предельных значений.

На фотографии структуры материала (рис. 1, с) под чередой крупных ячеек наблюдается скопление мелких пузырьков. Наличие пузырьков может быть вызвано упрочнением их оболочек цементными зернами с гидрофобной поверхностью или пленкой труднорастворимой кальциевой соли [12, 13].

По данным В.В. Стольников [13] флотационно-связанные между собой пузырьки могут образовывать скопления значительных размеров. Такие скопления пузырьков наблюдаются и в структуре пенобетона на белковой основе при использовании растворов с низким значением  $(В/Ц)_p$  (рис. 2, а).

Значение средней толщины межпоровой перегородки в пенобетоне на белковом пенообразователе Biofoam больше максимального зерна цемента и составляет 68–98 мкм. В пенобетоне на «Пентапав-430» толщина перегородки значительно меньше — 30 мкм. Зерно цемента, размер которого больше толщины перегородки синтетической пены, адсорбирует молекулы ПАВ и минерализует пузырек воздуха.

Упрочненные стенки мелких пузырьков препятствуют перераспределению воздуха и образованию ячейки, форма и размер которой соответствуют количеству раствора в смеси. Поэтому такая структура будет представлена сообщающимися порами с наличием многочисленных раковин.

В пенобетонной смеси на синтетическом пенообразователе с кратностью пены 33 при снижении В/Ц раствора наблюдается образование рыхлых цементных хлопьев, а полученная структура не является ячеистой (рис. 2, б).

В работах авторов [14–17] говорится о преимуществе по теплопроводности и прочности структур с мелкопористым строением.

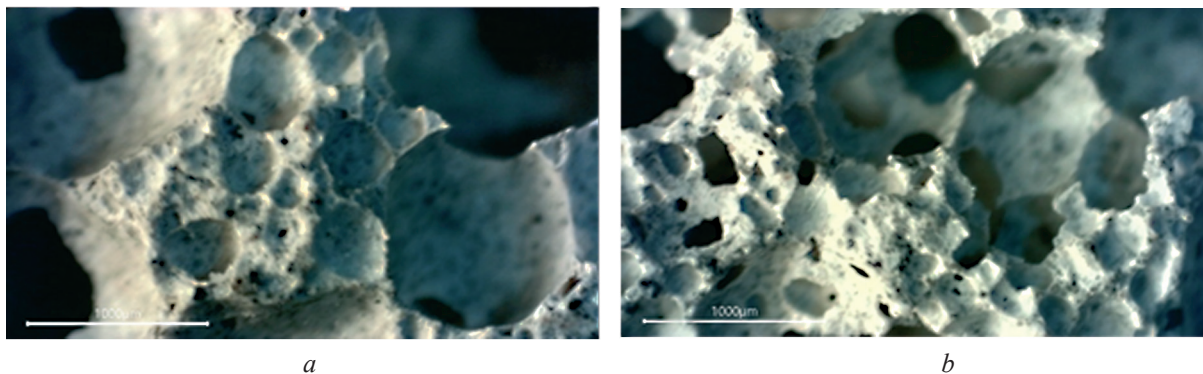
Однако проведенные исследования показывают, что минимальный размер пор ограничен объемом раствора и толщиной межпоровой перегородки, в связи с чем при повышении кратности пены требуется увеличивать удельную поверхность вяжущих компонентов. Поэтому для производства пенобетона предпочтительны композиционные цементы с более легким замещающим компонентом [18–24].

Таким образом, при уменьшении кратности пены снижается степень адсорбции молекул пенообразователя на зернах цемента и увеличивается возможность перераспределения материала и воздуха в смеси с учетом их объема.

Табл. 5. Характеристики структуры пенобетона

Table 5. Characteristics of the foam concrete structure

Кратность пены Foam expansion ratio	В/Ц W/C	Диаметр ячейки, мкм Cell diameter, $\mu\text{m}$					Толщина перегородки, мкм Thickness of the partition, $\mu\text{m}$				
		$d_{cp}$ $d_{av}$	$d_{max}$	$d_{min}$	$\sigma_d$	$C_v^d$	$t_{cp}$ $t_{av}$	$t_{max}$	$t_{min}$	$\sigma_t$	$C_v^t$
Пенобетон марки по средней плотности D300 на «Пентапав-430» Foam concrete, having average density D300 and made using Pentapav-430											
31	0,94	321	1800	73	300	0,94	30	90	10	12	0,39
15	0,93	356	1294	69	243	0,68	30	144	11	18	0,57
Пенобетон марки по средней плотности D500 на «Пентапав-430» Foam concrete, having average density D500 and made using Pentapav-430											
16	0,6	356	903	105	151	0,43	30,5	190	11	19	0,63
Пенобетон марки по средней плотности D300 на Biofoam Foam concrete, having average density D300 and made using Biofoam											
10	0,68	1228	2962	263	480	0,39	68	256	15	48	0,7
10	0,70	2075	3563	486	713	0,34	98	345	33	49	0,5
Пенобетон марки по средней плотности D500 на Biofoam Foam concrete, having average density D500 and made using Biofoam											
10	0,63	826	2482	134	432	0,52	82	358	19	59	0,72



**Рис. 2.** Фотография структуры пенобетона марки по плотности D300 с низким значением В/Ц: *a* — на белковом пенообразователе с кратностью пены 10 и  $(W/C)_p = 0,33$ ; *b* — на синтетическом пенообразователе с кратностью пены 33 и  $(W/C)_p = 0,6$

**Fig. 2.** The photograph of the structure of the average density D300 foam concrete featuring a low W/C value: *a* — made using the protein foaming agent with the foam expansion factor of 10 and  $(W/C)_m = 0.33$ ; *b* — made using the synthetic foaming agent with the foam expansion factor of 33 and  $(W/C)_m = 0.6$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования установлено, что при изготовлении пенобетонов на рядовом портландцементе предпочтительно использовать белковые пенообразователи с низкой кратностью пены. Строение и размер молекул белка способствуют снижению их адсорбции на поверхности цемента, для крупных молекул микропоры недоступны [25, 26], а не прямое присоединение гидрофобного радикала к гидрофильной цепи обеспечивает упругость и гибкость межфазного слоя вода-воздух.

Следует отметить, что проектирование состава пенобетона должно производиться исходя из параметров его структуры, определяемой с учетом спе-

цифики дальнейшего применения материала. При этом необходимо учитывать сделанные в процессе работы выводы:

- текучесть раствора смеси должна назначаться с учетом воды, содержащейся в пене;
- оптимальное количество воды в пенобетонной смеси обусловлено наличием среды для протекания процессов гидратации и устойчивостью вспененной массы;
- кратность пены должна быть согласована с тонкостью помола вяжущих. С повышением кратности пены тонкость помола увеличивается;
- минимальный размер пор в пенобетоне ограничен объемом раствора смеси.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lukranov R.E., Dyusseminov D.S., Utepov Ye.B., Bazarbayev D.O., Tsygulyov D.V., Yenkebayev S.B. et al. Homogeneous pore distribution in foam concrete by two-stage foaming // Magazine of Civil Engineering. 2021. No. 103 (3). P. 10313. DOI: 10.34910/MCE.103.13
2. Винокурова О.В., Баранова А.А. О целесообразности использования пластификаторов в производстве теплоизоляционного пенобетона // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 3 (38). С. 432–439. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-3-432-439
3. Feneuil B., Pitois O., Roussel N. Effect of surfactants on the yield stress of cement paste // Cement and Concrete Research. 2017. Vol. 100. Pp. 32–39. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.04.015
4. Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества: учебник для вузов. М.: Стройиздат, 1979. 476 с.
5. Литилин А.Б., Коренюгина Н.В., Векслер М.В. Селективная дезинтеграторная активация портланд-
- цемента (СДАП) // Строительные материалы. 2007. № 7. С. 74–76.
6. Kim D. Effect of adjusting for particle-size distribution of cement on strength development of concrete // Advances in Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 2018. Pp. 1–6. DOI: 10.1155/2018/1763524
7. Hashim M., Tantray M. Comparative study on the performance of protein and synthetic-based foaming agents used in foamed concrete // Case Studies in Construction Materials. 2021. Vol. 14. P. e00524. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00524
8. Chung S-Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evaluated using micro-CT images and numerical approaches // Applied Sciences. 2017. Vol. 7. Issue 6. P. 550. DOI: 10.3390/app7060550
9. Cao J., Xu R., Zhang N., Zhang L., Ji X. Characterization of pore structure of microbial foam concrete and its influence on properties // Journal of En-

- Engineering Science and Technology Review. 2021. Vol. 14. Issue 3. Pp. 158–166. DOI: 10.25103/jestr.143.18
10. Мухамедиев Ш.А., Васькина В.А. Эмульсии и пены: строение, получение, устойчивость // Масла и жиры. 2008. № 10. С. 22–26.
11. Сычев М.М. Твердение вяжущих веществ. Л. : Стройиздат, 1974. 80 с.
12. Liu Z., Zhao K., Hu C., Tang Y. Effect of water-cement ratio on pore structure and strength of foam concrete // Advances in Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 2016. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2016/9520294
13. Стольников В.В. Воздуховлакающие добавки в гидротехническом бетоне. Л. : Госэнергоиздат, 1953. 168 с.
14. Шахова Л.Д., Черноситова Е.С., Гончаров Л.Д. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений теплопроводности пенобетонов // Строительные материалы. 2007. № 8. С. 36–37.
15. Величко Е.Г., Кальгин А.А., Комар А.Г., Смирнов М.В. Технологические аспекты синтеза структуры и свойств пенобетона // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. № 3 (74). С. 68–71.
16. Chen G., Li F., Jing P., Geng J., Si Z. Effect of pore structure on thermal conductivity and mechanical properties of autoclaved aerated concrete // Materials. 2021. Vol. 14. Issue 2. P. 339. DOI: 10.3390/ma14020339
17. Kurochkina K.A., Suleimanova L.A., Kolomatsky A.S. Porosity of autoclave aerated concrete and foam concrete: origin of porosity and pore size // Magazine of Civil Engineering. 2021. No. 6 (106). P. 10606. DOI: 10.34910/MCE.106.6
18. Gong J., Zhu L., Li J., Shi D. Silica fume and nanosilica effects on mechanical and shrinkage properties of foam concrete for structural application // Advances in Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–10. DOI: 10.1155/2020/3963-089
19. Rassokhin A.S., Ponomarev A.N., Figovskiy O.L. Silica fumes of different types for high-performance fine-grained concrete // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 2 (78). Pp. 151–160. DOI: 10.18720/MCE.78.12
20. Steshenko A.B., Kudyakov A.I. Cement based foam concrete with aluminosilicate microspheres for monolithic construction // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 8 (84). Pp. 86–96. DOI: 10.18720/MCE.84.9
21. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Voronov V.V., Zagorodnyuk L.Kh., Fediuk R.S., Baranov A.V. et al. Durability behaviors of foam concrete made of binder composites // Magazine of Civil Engineering. 2020. No. 8 (100). P. 10003. DOI: 10.18720/MCE.100.3
22. Falliano D., Restuccia L., Ferro G., Gugliandolo E. Strategies to increase the compressive strength of ultra-lightweight foamed concrete // Procedia Structural Integrity. 2020. Vol. 28. Pp. 1673–1678. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.10.141
23. Стещенко А.Б., Кудряков А.И. Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 2. С. 56–62. DOI: 10.5862/MCE.54.6
24. Baranova A., Ryabkov I. Investigation of thermal conductivity of non-autoclaved foam concrete based on microsilica // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 667. Issue 1. P. 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/667/1/012010
25. Ларионова И.А., Михаловский С.В., Левченко М.П. Адсорбция и адсорбенты / ред. М.М. Дубинин и др. М. : Наука, 1987. 270 с.
26. Хохлов Т.Д., Нукитин Ю.С. Адсорбция белков на осажденном высокопористом кремнеземе и силикагеле // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. 2005. Т. 46. № 4. С. 227–230.

Поступила в редакцию 17 декабря 2021 г.

Принята в доработанном виде 17 декабря 2021 г.

Одобрена для публикации 13 января 2022 г.

Об авторах: **Ольга Владимировна Винокурова** — ведущий специалист сектора испытаний общестроительных материалов отдела испытаний материалов и конструкций; **Ангарское управление строительства**; 665832, Иркутская область, г. Ангарск, микрорайон 7А, д. 35; ORCID: 0000-0001-6136-720X; neitrino.78@mail.ru;

**Альбина Алексеевна Баранова** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства; **Ангарский государственный технический университет (АнГТУ)**; 665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, д. 60; РИНЦ ID: 680451, Scopus: 57205023783, ORCID: 0000-0002-5939-3334; baranova2012aa@mail.ru.

Вклад авторов:

Винокурова О.В. — концепция исследования, получение данных, их анализ и интерпретация, написание исходного текста, итоговые выводы.

Баранова А.А. — научное руководство, редактирование текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Lukpanov R.E., Dyusseminov D.S., Ute-pov E.B., Bazarbayev D.O., Tsygulyov D.V., Yenke-bayev S.B. et al. Homogeneous pore distribution in foam concrete by two-stage foaming. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 103(3):10313. DOI: 10.34910/MCE.103.13
2. Vinokurova O.V., Baranova A.A. Feasibility of using plasticisers for producing heat insulation foam concrete. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021, 11(3): 432-439. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-3-432-439 (rus.).
3. Feneuil B., Pitois O., Roussel N. Effect of surfactants on the yield stress of cement paste. *Cement and Concrete Research*. 2017; 100:32-39. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.04.015
4. Volzhensky A.V., Burov Yu.S., Kolokolnikov V.S. *Mineral binders*. Moscow, Stroyizdat, 1979; 476. (rus.).
5. Lipilin A.B., Korenyugina N.V., Veksler M.V. Selective disintegrator activation of Portland cement (SDAP). *Building Materials*. 2007; 7:74-76. (rus.).
6. Kim D. Effect of adjusting for particle-size distribution of cement on strength development of concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018; 2018:1-6. DOI: 10.1155/2018/1763524
7. Hashim M., Tantray M. Comparative study on the performance of protein and synthetic-based foaming agents used in foamed concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2021; 14:e00524. DOI: 10.1016/j.cscm.2021.e00524
8. Chung S-Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evaluated using micro-CT images and numerical approaches. *Applied Sciences*. 2017; 7(6):550. DOI: 10.3390/app7060550
9. Cao J., Xu R., Zhang N., Zhang L., Ji X. Characterization of pore structure of microbial foam concrete and its influence on properties. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2021; 14(3):158-166. DOI: 10.25103/jestr.143.18
10. Mukhamediev Sh.A., Vaskina V.A. Emulsions and foams: structure, preparation, stability. *Oils and Fats*. 2008; 10:22-26. (rus.).
11. Sychev M.M. *Hardening of binders*. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1974; 80. (rus.).
12. Liu Z., Zhao K., Hu C., Tang Y. Effect of water-cement ratio on pore structure and strength of foam concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016; 2016:1-9. DOI: 10.1155/2016/9520294
13. Stolnikov V.V. *Air-entrapping additives in hydraulic concrete*. Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1953; 168. (rus.).
14. Shakhova L.D., Chernositova E.S., Goncharov L.D. Comparison of calculated and experimental values of thermal conductivity of foam concrete. *Building Materials*. 2007; 8:36-37. (rus.).
15. Velichko E.G., Kalgin A.A., Komar A.G., Smirnov M.V. Technological aspects of the synthesis of the structure and properties of foam concrete. *Construction Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century*. 2005; 3(74):68-71. (rus.).
16. Chen G., Li F., Jing P., Geng J., Si Z. Effect of pore structure on thermal conductivity and mechanical properties of autoclaved aerated concrete. *Materials*. 2021; 14(2):339. DOI: 10.3390/ma14020339
17. Kurochkina K.A., Suleimanova L.A., Kolomatsky A.S. Porosity of autoclave aerated concrete and foam concrete: origin of porosity and pore size. *Magazine of Civil Engineering*. 2021; 6(106):10606. DOI: 10.34910/MCE.106.6
18. Gong J., Zhu L., Li J., Shi D. Silica Fume and Nanosilica Effects on Mechanical and Shrinkage Properties of Foam Concrete for Structural Application. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020; 2020:1-10. DOI: 10.1155/2020/3963089
19. Rassokhin A.S., Ponomarev A.N., Figovsky O.L. Silica fumes of different types for high-performance fine-grained concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 2(78):151-160. DOI: 10.18720/MCE.78.12
20. Steshenko A.B., Kudryakov A.I. Cement based foam concrete with aluminosilicate microspheres for monolithic construction. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 8(84):86-96. DOI: 10.18720/MCE.84.9
21. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Voronov V.V., Zagorodnyuk L.Kh., Fediuk R.S., Baranov A.V. et al. Durability behaviors of foam concrete made of binder composites. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 8(100):10003. DOI: 10.18720/MCE.100.3
22. Falliano D., Restuccia L., Ferro G., Gugliandolo E. Strategies to increase the compressive strength of ultra-lightweight foamed concrete. *Procedia Structural Integrity*. 2020; 28:1673-1678. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.10.141
23. Steshenko A.B., Khudyakov A.I. Earlier structure formation of a foam concrete mixture with a modifying additive. *Civil Engineering magazine*. 2015; 2:56-62. DOI: 10.5862/MCE.54.6 (rus.).
24. Baranova A., Ryabkov I. Investigation of thermal conductivity of non-autoclaved foam concrete based on microsilica. *IOP Conference Series: Ma-*

*terials Science and Engineering*. 2019; 667(1):012010.  
DOI: 10.1088/1757-899X/667/1/012010

25. Larionova I.A., Mikhailovsky S.V., Levchenko M.P. *Adsorption and adsorbents* / ed. M.M. Dubinin et al. Moscow, Science, 1987; 270. (rus.).

26. Khokhlov T.D., Nikitin Yu.S. Adsorption of proteins on precipitated highly porous silica and silica gel. *Bulletin of the Moscow University. Series 2. Chemistry*. 2005; 46(4):227-230. (rus.).

*Received December 17, 2021.*

*Adopted in revised form on December 17, 2021.*

*Approved for publication on January 13, 2022.*

**BIONOTES:** **Ol'ga V. Vinokurova** — Leading Specialist of the Sector for Testing General Construction Materials of the Department for Testing Materials and Structures; **Angarsk Management of Construction**; 35, microdistrict 7A, Angarsk, 665835, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6136-720X; e-mail: neutrino.78@mail.ru;

**Albina A. Baranova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering; **Angarsk State Technical University (ASTU)**; 60 Chaykovskiy st., Angarsk, 665835, Russian Federation; ID RISC: 680451, Scopus: 57205023783, ORCID: 0000-0002-5939-3334; baranova2012aa@mail.ru.

*Contribution of the authors:*

*Vinokurova O.V. — research concept, data acquisition, analysis and interpretation, writing the source text, final conclusions.*

*Baranova A.A. — scientific guidance, text editing, final conclusions.*

*The authors declare no conflicts of interests.*

# БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 643.9

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.60-71

## Условия образования наледей на скатных крышах зданий с холодным чердаком

Ростислав Александрович Горшков<sup>1</sup>, Илья Анатольевич Войлоков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП); г. Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); г. Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Описан механизм образования наледей на крышах зданий со скатной кровлей и холодным чердаком. Предложен комплекс мероприятий по нормализации температурно-влажностного режима (ТВР) на неотапливаемом чердаке. Приведены зависимости температуры воздуха на чердаке от температуры наружного воздуха до и после проведения предлагаемого комплекса мероприятий по нормализации ТВР.

**Материалы и методы.** Разработана модель и уравнение теплового баланса неотапливаемого чердачного помещения.

**Результаты.** Показано, что после утепления ограждающих конструкций, отделяющих холодный чердак от отапливаемых помещений, стен вентиляционных каналов, пересекающих пространство чердака, а также трубопроводов системы отопления с верхней разводкой значительно сокращается интервал температур наружного воздуха, при котором создаются благоприятные условия для образования наледей на холодных участках карнизного свеса кровли, ввиду чего уменьшается вероятность образования сосулек на скатной крыше. В отличие от активных способов защиты крыш от наледей (так называемых антиобледенительных систем), предлагаемый в работе комплекс мероприятий не требует затрат энергоресурсов при эксплуатации зданий в холодный период года.

**Выводы.** Помимо уменьшения вероятности образования наледей на крыше, реализация приведенного комплекса инженерно-технических мероприятий позволяет повысить уровень теплоизоляции ограждающих конструкций и трубопроводов системы отопления, сократить трансмиссионные потери тепловой энергии через утепленные ограждающие конструкции, отделяющие холодный чердак от отапливаемых помещений, уменьшить потребление тепловой энергии в здании в холодный период года, улучшить параметры микроклимата на верхних этажах здания, уменьшить риски повреждения кровельного покрытия при механической уборке снега с крыши, увеличив тем самым межремонтный период эксплуатации конструктивных и ограждающих элементов крыши.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** здание, скатная крыша, холодный чердак, стены, кровельное покрытие, чердачное перекрытие, температурно-влажностный режим, снег, ледяная дамба, наледь, теплоизоляция, утепление, энергосбережение, энергоэффективность

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность доктору технических наук, профессору кафедры физики Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского Павлу Павловичу Рымкевичу за ряд ценных замечаний и советов, которые позволили более детально разобраться в сути рассматриваемой проблемы и тем самым повысить научный уровень исследования. Авторы также выражают благодарность рецензентам за усилия и время, потраченное на ознакомление с материалом статьи.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Горшков Р.А., Войлоков И.А. Условия образования наледей на скатных крышах зданий с холодным чердаком // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 1. С. 60–71. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.60-71

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

## Conditions for the formation of ice dams on pitched roofs of buildings with cold attics

Rostislav A. Gorshkov<sup>1</sup>, Ilya A. Voilokov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI); Saint Petersburg, Russian Federation;

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);  
Saint Petersburg, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The article describes the mechanism of ice formation on the roofs of buildings with pitched roofs and cold attics.

**Materials and methods.** The authors developed a model and a heat balance equation for an unheated attic room and proposed a set of measures to normalize the temperature and humidity modes in unheated attics.

**Results.** The study demonstrates dependences between the air temperature in the attic and the outdoor air temperature before and after the implementation of the proposed set of measures designated to normalize the temperature and humidity modes. The findings suggest that after the insulation of (1) enclosing structures separating a cold attic from heated rooms, (2) the walls of ventilation ducts, crossing the attic space and (3) the pipelines of the down-feed heating system, the outdoor temperature range is significantly reduced, which reduces the likelihood of roof icing.

**Conclusions.** In addition, the implementation of the proposed set of engineering and technological measures allows not only increasing the thermal insulation of enclosing structures and pipelines of a heating system, but also reduces thermal energy losses in transmission and the consumption of thermal energy in a building during a cold season, improves the indoor climate parameters on the upper floors of a building, reduces the risks of damage to the roofing during mechanical snow removal, thereby increasing the maintenance period of structural and enclosing elements of the roof.

**KEYWORDS:** building, pitched roof, cold attic, walls, roofing, attic floor, temperature and humidity mode (THM), snow, ice dam, ice, thermal insulation, insulation, energy saving, energy efficiency

*Acknowledgements:* The authors express gratitude to Pavel Pavlovich Rymkevich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Physics at the A.F. Mozhaisky Military Space Academy for a number of valuable comments and advice, which gave insight into the problem under consideration and thereby raised the research value of the study. The authors also express gratitude to the reviewers for their effort and time.

**FOR CITATION:** Gorshkov R.A., Voilokov I.A. Conditions for the formation of ice dams on pitched roofs of buildings with cold attics. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(1):60-71. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.60-71 (rus.).

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

## ВВЕДЕНИЕ

Наледи на крышах зданий со скатной кровлей представляют опасность для пешеходов и транспортных средств, припаркованных вблизи зданий. Падение наледей с крыш неоднократно приводило к травмам и даже гибели людей [1], повреждению транспортных средств [1], наружных блоков кондиционеров [2], козырьков, балконов, иных выступающих архитектурных элементов зданий [3], а также тротуаров и дорожных покрытий [4]. Механическое удаление наледей с карнизных свесов кровель часто приводит к повреждению кровельного покрытия [5] и, как следствие, появлению протечек в весенний период эксплуатации, к ускоренному износу конструктивных и ограждающих элементов крыши и необходимости более частого их ремонта и реконструкции [6]. Протечки на крышах способствуют появлению биоповреждений в стропильных элементах крыши [7], намоканию утеплителя чердачных перекрытий, потере им своих теплоизоляционных свойств [8], промерзанию перекрытия (особенно заметному в угловых комнатах в местах сопряжения чердачного перекрытия с наружными стенами), образованию конденсата на холодных поверхностях [9], появлению грибка на участках с теплопроводными включениями, ухудшению параметров микроклимата на верхних этажах зданий, расположенных под холодным чердаком.

Основные причины образования ледяных дамб на крышах зданий и их негативные последствия подробно рассмотрены в работах [10–12]. К образованию наледей на карнизных свесах приводит нарушение температурно-влажностного режима (ТВР) холодных (неотапливаемых) чердаков, низкий уровень теплоизоляции ограждающих конструкций, отделяющих холодный чердак от отапливаемых помещений, вследствие чего температура воздуха на чердаке оказывается выше рекомендуемых значе-

ний [10]. Факторы, влияющие на ТВР скатных крыш с холодным чердаком, рассмотрены в статье [11]. В труде [12] выполнен анализ причин формирования наледи на чердачных крышах отапливаемых зданий и сформулированы конкретные предложения по предотвращению ее образования.

Методика составления теплового баланса неотапливаемых чердачных помещений, на основании которого представлено инженерно-техническое обоснование состава и перечня мероприятий, направленных на предотвращение образования наледей на крышах исторических зданий со скатной кровлей, описана в исследованиях [13, 14]. Показаны схема образования наледей на карнизных свесах и условия для их возникновения [13].

В работе [15] приведены комплекс мер по устранению наледей на скатных крышах, пример расчета и составления уравнения теплового баланса неотапливаемого чердачного помещения, подбор изоляции для ограждающих конструкций, отделяющих холодный чердак от помещений с нормативным тепловым режимом, и трубопроводов системы отопления, расчет требуемых толщин изоляции. Мониторинг эффективности различных технических средств, которые могут быть использованы в борьбе с наледями и сосульками на крышах, рассмотрен в публикации [16]. Выявлена зависимость температуры чердачного пространства от конструктивного исполнения крыши, вида паро- и теплоизоляции [17].

Оценка воздухообмена, требуемого для нормализации температурно-влажностного режима холодных чердаков, приведена в работах [18, 19]. Для нормализации ТВР без дополнительной изоляции ограждающих конструкций необходим более, чем восьмикратный воздухообмен чердачных помещений, что невозможно обеспечить при естественных режимах их вентиляции. В этой связи только комплекс мер, включая утепление чердачных перекры-

тий, стен вентканалов, трубопроводов отопления, проложенных на чердаке, позволяет обеспечить заданную температуру воздуха на чердаке и тем самым уменьшить вероятность образования наледей на скатных крышах исторических зданий.

Влияние формы и угла наклона скатов на задержание снега и образование наледи на чердачных крышах продемонстрировано в исследовании [20]. Определено, что по мере увеличения угла наклона скатов крыш меньше вероятность задержания снега на скатах и образования наледи на карнизных свесах.

Сравнительный анализ потерь тепловой энергии до и после утепления наружных ограждающих конструкций зданий приведен в работах [21–23]. Установлено, как меняются трансмиссионные потери тепловой энергии через наружную оболочку здания до и после ее утепления.

Методика и примеры расчета окупаемости инвестиций, направленных на повышение уровня теплоизоляции наружных ограждающих конструкций, в том числе чердачных перекрытий зданий со скатной крышей и холодным чердаком, представлены в трудах [24–28].

Описанные выше методы борьбы с наледями относятся к так называемым пассивным способам защиты, не требующим при эксплуатации затрат тепловой и электрической энергии. Существуют также активные способы защиты кровли от образования на ней наледи, подразумевающие подключение к источнику электрической энергии. К ним относятся антиобледенительные системы на базе нагревательных кабелей или матов [29]. Их действие заключается в том, что при пропускании электрического тока по кабелям или матам, уложенным на холодных участках крыши, а также в зонах вероятного образования снеговых мешков, кабели и маты при нагревании под действием тока растапливают снег и наледь в местах их прокладки. Как правило, антиобледенительные системы обеспечивают обогрев карнизных свесов, водосточных желобов, водосборных воронок и водосточных труб, т.е. участков крыши, где риск образования наледи наиболее вероятен.

В исследовании рассмотрены водяные системы антиобледенения кровель и удаления снега [30]. Суть предлагаемого авторами [30] технического решения заключается в использовании вторичного тепла для нагревания воды в трубах для растапливания наледи и снега на крыше конкретного объекта — Ледового дворца спорта «Татнефть Арена».

Иные, менее распространенные способы удаления наледей на крышах зданий со скатной кровлей, изучены в работах [2, 31–34].

Следует отметить, что при реализации активных способов устранения наледей на крышах борьба осуществляется не с причиной, а со следствием. Кроме того, реализация активных способов защиты крыш от наледей предполагает при эксплуатации

затраты энергоресурсов, что противоречит принципам энергосбережения и часто не находит согласие со стороны жителей многоквартирных домов, так как не только установка, включающая стоимость изделий и монтаж, но и содержание, а также эксплуатация таких систем требуют постоянных расходов.

Наиболее предпочтительным является пассивный способ борьбы с наледями, рассматриваемый в настоящей работе, не предусматривающий затраты энергетических ресурсов при эксплуатации здания. Повышение уровня тепловой защиты чердачного перекрытия и иных ограждающих конструкций (входных дверей, стен венткамер, перегородок лифтовых шахт и пр.), отделяющих холодный чердак от отапливаемых помещений, способствует уменьшению трансмиссионных потерь тепловой энергии, сокращению потребляемой в зданиях энергии на отопление, улучшению параметров микроклимата в холодный и теплый периоды года на верхнем этаже, расположенном под холодным чердаком.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследованиях [10–17] показано, что основная причина образования наледей на скатных крышах — нарушение ТВР в неотапливаемых чердачных помещениях, когда при установлении устойчивых отрицательных температур наружного воздуха в помещениях холодного чердака температура воздуха длительный период времени остается положительной. Низкий уровень теплоизоляции ограждающих конструкций и изоляции трубопроводов [12], уплотнение насыпных утеплителей чердачных перекрытий [35], недостаточная кратность воздухообмена чердачных помещений [18, 19] приводят к тому, что температура воздуха на чердаке значительно выше температуры наружного воздуха. Температура воздуха внутри чердака, особенно под коньком стропильного прогона и вблизи выходов вентиляционных каналов, оказывается положительной, что приводит к подтаиванию нижних слоев снега на крыше здания. Талая вода стекает к холодному карнизному свесу кровли, где постепенно формируется ледяная дамба (рис. 1), перетекает через дамбу, замерзает и формирует свисающие с карниза и водосборных воронок наледи (сосульки). В начальный период времени наиболее интенсивно процесс образования наледей протекает в местах расположения водосборных воронок, а при их зарастании льдом и на остальных участках карнизных свесов (рис. 2).

Комплекс мероприятий по нормализации ТВР неотапливаемых чердачных помещений с целью частичного или полного устранения причин образования наледей на карнизных свесах скатных крыш с неотапливаемым чердаком представлен в регио-



**Рис. 1.** Ледяная дамба на холодном участке карнизного свеса  
**Fig. 1.** An ice dam on the cold section of an eaves edge



**Рис. 2.** Сосульки на карнизном свесе крыши  
**Fig. 2.** Icicles on the eaves edge of a roof

нальном методическом документе (РМД)<sup>1</sup>. В РМД приведены методики расчета требуемой толщины слоя теплоизоляции при утеплении чердачных перекрытий и иных ограждающих конструкций, отделяющих чердак от помещений с более высокой температурой внутреннего воздуха; расчета требуемой толщины слоя теплоизоляции при утеплении трубопроводов отопления и горячего водоснабжения, проложенных в помещениях холодного чердака; рекомендации по монтажу теплоизоляции ограждающих конструкций, монтажу изоляции трубопроводов, по устройству вентиляционных продухов, предназначенных для повышения кратности воздухообмена в холодном чердачном помещении; приведены узлы и конструктивные решения; даны конкретные примеры расчета требуемой толщины теплоизоляции для утепления ограждающих конструкций и инженерных коммуникаций, расчетные теплотехнические характеристики материалов и изделий, применяемых для утепления ограждающих конструкций и изоляции трубопроводов, пример составления уравнения теплового баланса неотапливаемого чердака.

Следует ожидать, что реализация предлагаемых технических решений будет способствовать снижению температуры воздуха на чердаке и сближению ее с температурой наружного воздуха. В этих условиях значительно уменьшается диапазон наружных температур, при котором возникают благоприятные условия для образования наледи на карнизных свесах скатной крыши.

Во всех перечисленных выше работах отсутствует анализ параметров наружного воздуха, при которых резко увеличивается вероятность образования наледей на карнизных свесах скатных крыш

<sup>1</sup> РМД 23-27-2017. Санкт-Петербург. Рекомендации по нормализации температурно-влажностного режима неотапливаемых чердачных помещений: одобрен и рекомендован к применению на территории Санкт-Петербурга распоряжением Комитета по строительству от 31.10.2017 № 204-р.

и элементах водосточной системы здания до и после нормализации ТВР в неотапливаемых чердачных помещениях.

Цель настоящего исследования — установление интервалов температур наружного воздуха, в пределах которых существует высокая вероятность образования наледей на крышах зданий со скатной кровлей и холодным чердаком.

Задачи исследования рассмотрены на примере конкретного объекта — жилого многоквартирного здания со скатной крышей и холодным чердаком.

Ниже приведены исходные данные для расчета.

Расчетная температура внутреннего воздуха:

- в жилых помещениях  $t_{в}^{жк} = 20$  °С;
- на лестничной клетке  $t_{в}^{л.кл.} = 16$  °С.

Расчетная температура наружного воздуха  $t_{н} : -27$  °С.

Наличие слуховых окон: 3 шт., оборудованы решетками.

Приточные и вытяжные вентиляционные продухи отсутствуют.

Место расположения здания: во внутренних дворах городского квартала.

Кратность воздухообмена чердачных помещений  $n_a : 0,5$  ч<sup>-1</sup>.

Площади ограждающих конструкций  $A_p^+$ , отделяющие чердачное помещение от отапливаемых помещений и вентканалов, составляют:

- чердачного перекрытия — 583 м<sup>2</sup>;
- вентиляционных каналов, проходящих через чердачное помещение, — 32 м<sup>2</sup>;
- входных люков (а количестве 2 шт.) — 1,2 м<sup>2</sup>.

Площади ограждающих конструкций  $A_p^-$ , отделяющих чердачное помещение от наружного воздуха:

- кровельного покрытия — 970 м<sup>2</sup>;
- карнизных участков наружных стен — 82 м<sup>2</sup>.

Площади приняты по данным обмерных работ. Строительный объем неотапливаемого чердачного помещения  $V_{ч} — 1765$  м<sup>3</sup>.

Сопrotивления теплопередаче ограждающих конструкций холодного чердака:

- чердачного перекрытия (существующий утеплитель: гравий из шлака толщиной 180–220 мм) —  $1,35 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ ;
- каменной кладки вентиляционных каналов, пересекающих помещение неотапливаемого чердака, —  $0,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ ;
- люков —  $0,42 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ ;
- карнизных участков наружных стен —  $1,07 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ ;
- кровельного покрытия (с учетом снежного покрова толщиной 30 см) —  $0,66 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ .

Толщина снежного покрова 30 см принята в качестве наиболее неблагоприятного условия. Согласно требованиям п. 4.6.1.23 Правил и норм технической эксплуатации жилищного фонда<sup>2</sup> на крышах с наружным водоотводом накопление снега слоем более 30 см не допускается.

Система отопления: двухтрубная, вертикальная, с верхней разводкой.

Общая протяженность трубопроводов системы отопления — 102 п. м, из них:

- 74 п. м — трубопроводы с условным диаметром 50 мм;
- 28 п. м — трубопроводы с условным диаметром 32 мм.

Изоляция трубопроводов: полотно прошивное стекловолнистое толщиной 10 мм, снаружи обернуто холстом из льняной ткани и перетянута лентой (бандажом).

Состояние изоляции: неудовлетворительное (ветхость, локальные повреждения, намороз).

Потери тепловой энергии с 1 м длины цилиндрического трубопровода  $q_L$  условным диаметром:

- 50 мм — 61,6 Вт/м;
- 32 мм — 46,4 Вт/м.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для расчета температуры воздуха на чердаке использовано уравнение теплового баланса в виде, предложенном в работах [10, 13, 15, 36]:

$$t_b^u = \frac{t_b \sum_{i=1}^n \left( \frac{A_i^+}{R_i^+} \right) + \sum_{k=1}^n (q_{Lk} l_k) + t_n \sum_{j=1}^n \left( \frac{A_j^-}{R_j^-} \right) + 0,28 V_{\text{ч}} n_{\alpha} t_n}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{A_i^+}{R_i^+} \right) + \sum_{j=1}^n \left( \frac{A_j^-}{R_j^-} \right) + 0,28 V_{\text{ч}} n_{\alpha}}, \quad (1)$$

где  $t_b$  — температура внутреннего воздуха в помещениях верхнего этажа здания, °С;  $A_i^+$ ,  $R_i^+$  — соответственно площадь,  $\text{м}^2$ , и сопротивление теплопередаче,  $\text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ , ограждающих конструкций, отделяющих холодный чердак от отапливаемых по-

мещений и вентиляционных каналов;  $t_n$  — температура наружного воздуха, °С;  $A_j^-$ ,  $R_j^-$  — соответственно площадь,  $\text{м}^2$ , и сопротивление теплопередаче,  $\text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ , ограждающих конструкций, отделяющих холодный чердак от наружной среды;  $q_{Lk}$  — линейная плотность теплового потока, приходящаяся на 1 п. м длины трубопровода  $k$ -го диаметра с учетом теплопотерь через изолированные опоры, фланцевые соединения и арматуру, Вт/м;  $l_k$  — длина трубопровода  $k$ -го диаметра, м;  $V_{\text{ч}}$  — строительный объем помещений холодного чердака,  $\text{м}^3$ ;  $n_{\alpha}$  — кратность воздухообмена в помещениях холодного чердака,  $\text{ч}^{-1}$ .

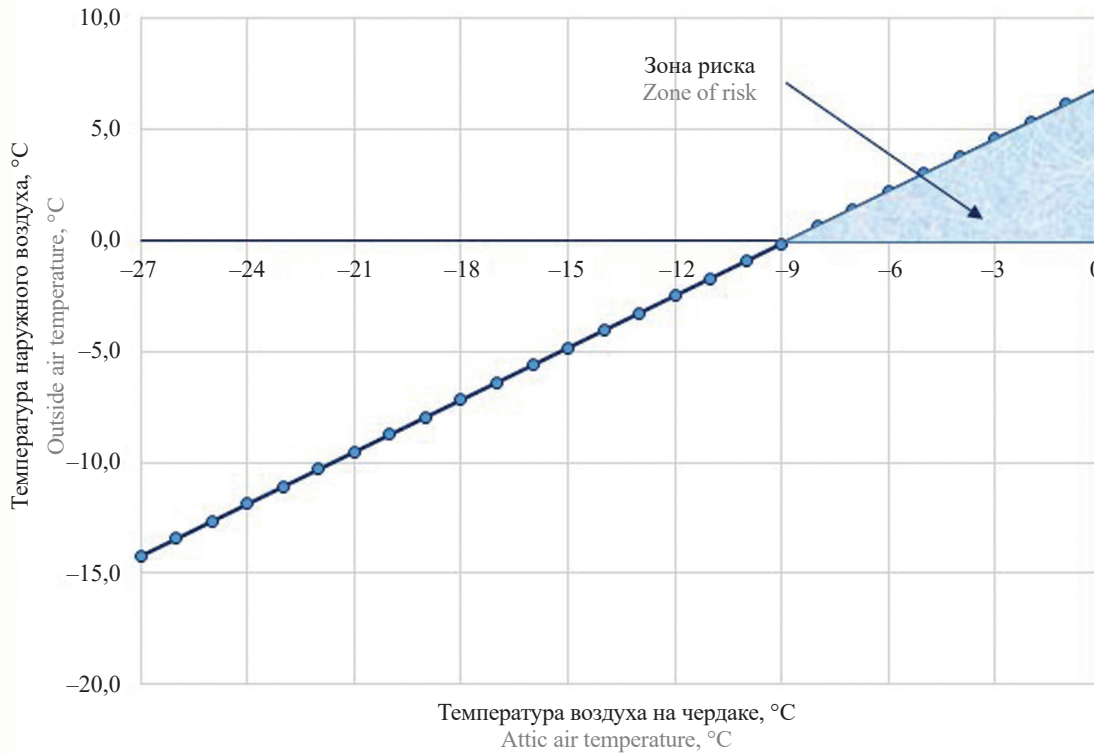
Результаты расчета температуры воздуха на чердаке по формуле (1) при отрицательных температурах наружного воздуха в интервале от  $-27$  до  $-1$  °С показаны на рис. 3. Из приведенного графика следует, что при температурах наружного воздуха от 0 до  $-9$  °С существует высокая вероятность возникновения наледи на крыше исследуемого объекта, поскольку температура воздуха на чердаке в этом диапазоне наружных температур оказывается положительной, что способствует растапливанию нижних слоев снега, лежащего на скатах крыши.

Из графика также видно, что при температуре наружного воздуха  $-27$  °С расчетная температура воздуха на чердаке  $t_b^u$  составляет  $-14,2$  °С. Следовательно, основное требование по нормализации ТВР в рассматриваемом неотапливаемом чердаке, согласно которому температура воздуха на чердаке не должна более чем на 4 °С превышать температуру наружного воздуха, не обеспечивается. Требование не выполняется не только при расчетной температуре наружного воздуха, но и во всем диапазоне температур наружного воздуха. Необходимы меры по приведению параметров микроклимата на чердаке к нормативному состоянию.

Результаты натурных измерений показали, что в периоды установления наиболее низких температур наружного воздуха, температура воздуха на чердаке не опускается ниже  $-14$  °С. Таким образом, расчетная температура воздуха на чердаке оказалась близкой к минимальной фактической. Выходит, что модель позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью рассчитать температуру воздуха на чердаке и смоделировать параметры микроклимата в нем при изменении параметров модели.

Точность модели в значительной степени зависит от качества сбора исходных данных: геометрических и теплотехнических характеристик ограждающих конструкций, их технического состояния, состояния теплоизоляционных слоев. В этой связи перед началом моделирования важно выполнить детальное инструментальное обследование чердачного помещения и обмерные работы. В ряде случаев может потребоваться отбор образцов теплоизоляции для определения ее фактической влажности и теплопроводности.

<sup>2</sup> Об утверждении Правил и норм технической эксплуатации жилищного фонда : Постановление Госстроя РФ от 27.09.2003 № 170.



**Рис. 3.** График зависимости температуры воздуха на чердаке от температуры наружного воздуха до реализации комплекса мероприятий по нормализации ТВР на чердаке

**Fig. 3.** The attic air temperature — outside air temperature curve before the implementation of a set of measures designated to normalize the temperature and humidity modes in the attic

С целью нормализации ТВР исследуемого холодного чердака разработан следующий перечень инженерно-технических мероприятий:

- устройство приточных и вытяжных вентиляционных продухов;
- утепление чердачного перекрытия;
- утепление стен вентиляционных каналов на чердаке;
- утепление трубопроводов системы отопления, проложенных на чердаке.

Приточные вентиляционные продухи сделаны таким образом, чтобы их площадь совместно с чистой площадью слуховых окон составила 1/300 площади горизонтальной проекции кровли. Вытяжные продухи выполнены в виде отдельных отверстий (флюгарок), располагаемых вдоль конька крыши в шахматном порядке на расстоянии 6–8 м друг от друга. Площадь вытяжных вентиляционных продухов принята на 10–15 % больше площади приточных (карнизных) продухов. С учетом выполненных работ по устройству вентиляционных продухов кратность воздухообмена должна возрасти и при самых неблагоприятных условиях составить не менее 1,5 ч<sup>-1</sup>.

При утеплении ограждающих конструкций в качестве слоя теплоизоляции приняты изделия с теплопроводностью 0,040 Вт/(м · К), для изоляции

трубопроводов системы отопления — с теплопроводностью 0,038 Вт/(м · К) при 25 °С. С учетом принятых в проекте технических решений и материалов значения сопротивлений теплопередаче ограждающих конструкций чердака составят:

- чердачного перекрытия — 4,07 м<sup>2</sup> · К/Вт;
- участков кладки вентиляционных каналов, проходящих через помещение неотапливаемого чердака, — 1,35 м<sup>2</sup> · К/Вт;
- остальных ограждающих конструкций — без изменения.

Толщина снежного покрова, лежащего на крыше, как и в исходном варианте расчета, принята равной 30 см.

После утепления трубопроводов системы отопления потери тепловой энергии с 1 м длины утепленного цилиндрического трубопровода составят:

- с условным диаметром 50 мм — 20,0 Вт/м;
- с условным диаметром 32 мм — 16,4 Вт/м.

График зависимости температуры воздуха на чердаке от температуры наружного воздуха при новых исходных данных представлен на рис. 4.

Из графика видно, что расчетная температура воздуха в неотапливаемом чердачном помещении  $t_{в}^{н}$  при расчетной температуре наружного воздуха равна –23 °С. Откуда следуют соответствие параметров микроклимата в неотапливаемом чердачном поме-

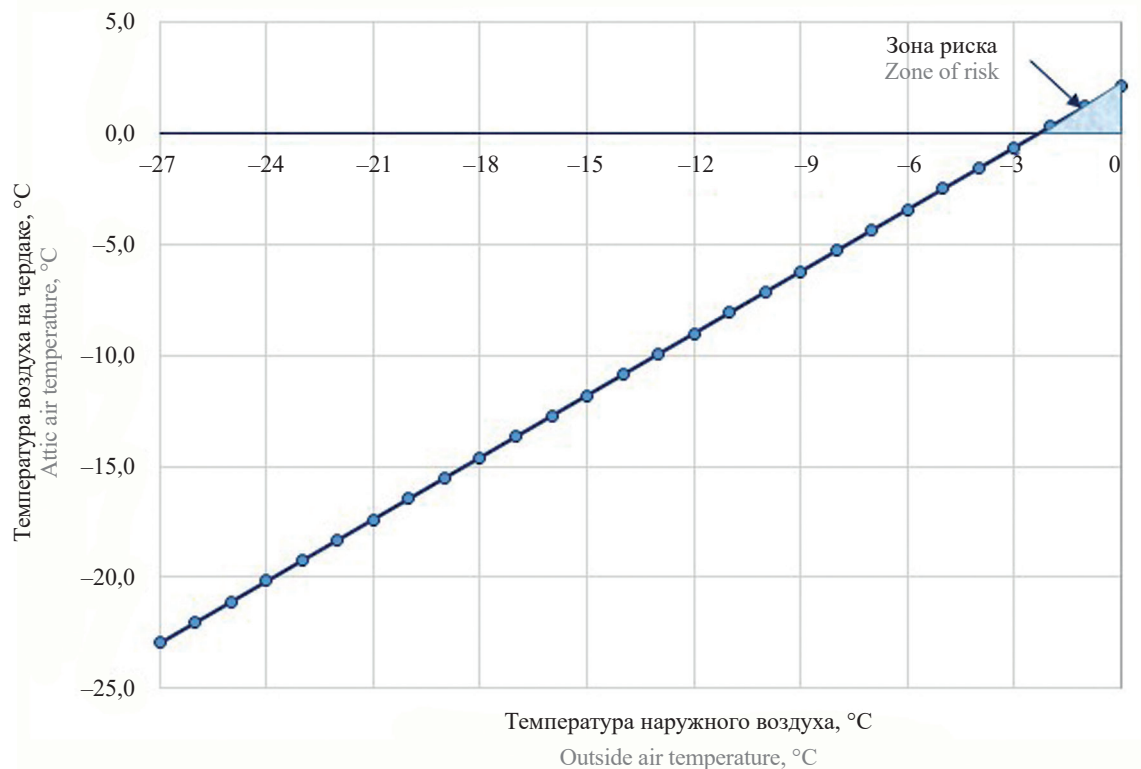


Рис. 4. График зависимости температуры воздуха на чердаке от температуры наружного воздуха после реализации комплекса мероприятий по нормализации ТВР на чердаке

Fig. 4. The attic air temperature — outside air temperature curve after the implementation of a set of measures designated to normalize the temperature and humidity modes in the attic

щении установленным требованиям и достаточность принятых проектных решений.

Вероятность образования наледи на крыше остается, однако сужается диапазон наружных температур (от 0 до  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), при котором существует риск появления ледяной дамбы на холодных участках карнизного свеса кровельного покрытия. Разность температур воздуха на улице и чердаке при этом составляет не более  $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При данной разности температур тепловой поток через поверхность кровельного покрытия и снежный покров на крыше оказывается крайне незначительным ( $\approx 3,5\text{ Вт/м}^2$ ), ввиду чего для растапливания снежного массива на крыше необходимо значительное время.

В отличие от активных способов защиты (реализуемых, как правило, в виде нагревательных кабелей, пленок и матов), предложенный комплекс пассивных инженерно-технических решений, не требующих затрат энергоресурсов в процессе эксплуатации, в полной мере можно отнести к энергосберегающим.

В Санкт-Петербурге в период с 2018 по 2021 гг. комплекс технических решений, направленный на нормализацию ТВР холодных чердаков, был реализовано более, чем в 7000 многоквартирных домах. Реализация предлагаемых технических решений позволила значительно снизить риск воз-

никновения наледей на скатных крышах и тем самым уменьшить количество травм и происшествий, связанных со сходом наледи и падением сосулек с крыш зданий.

Зима 2019/2020 гг., на фоне общего потепления климата [36], оказалась бесснежной и теплой (минимальная температура наружного воздуха составила минус  $5,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), поэтому не являлась показательной для оценки эффективности предлагаемого в [10, 13–15] комплекса мероприятий. Однако зима 2020/2021 гг. оказалась представительной для целей настоящего исследования. Ввиду того, что мероприятия по нормализации ТВР холодных чердаков были реализованы не на всех объектах города, в ряде случаев наледи на скатных крышах имели место. В ряде случаев были выявлены нарушения, не обеспечивающие требуемое снижение температуры в холодных чердачных помещениях. Например, не всегда соблюдаются требования по обеспечению заданной площади приточных и вытяжных отверстий, обеспечивающих заданный воздухообмен на чердаке. Часто для утепления чердачных перекрытий вместо эффективных теплоизоляционных материалов используется керамзитовая засыпка, не обеспечивающая требуемый уровень тепловой защиты чердачного перекрытия. Согласно данным табл. Г 1 РМД 23-27-2017 требуемая толщина ке-



**Рис. 5.** Наледи на скатной крыше исторического особняка (Москва, Покровский бульвар, 21.01.2021)

**Fig. 5.** Ice on the pitched roof of a historic mansion (Moscow, Pokrovsky Blvd, January 21, 2021)



**Рис. 6.** Наледи на скатной крыше общественного здания (Москва, Хитровский пер., 21.01.2021)

**Fig. 6.** Ice on the pitched roof of a public building (Moscow, Khitrovsky Lane, January 21, 2021)

рамзитового гравия должна составлять более 500 мм. По факту толщина гравийной засыпки на объектах не превышает 200 мм. В этой связи потери тепловой энергии через перекрытие оказываются существенно выше нормативных, что повышает риск образования наледи на карнизных свесах скатных крыш. В этой связи для утепления ограждающих конструкций холодного чердака рекомендуется применять эффективные теплоизоляционные материалы с теплопроводностью менее 0,06 Вт/(м·К). Однако, за последние 3 года количество объектов, потенциально опасных с позиции высокого риска схода и падения наледей со скатных крыш, в Санкт-Петербурге резко сократилось.

Анализ информации по запросу «падение наледей и сосулек с крыш» в интернете, а также личные наблюдения авторов, показали, что проблема образования и схода наледей с крыш остается актуальной в других городах страны, в том числе в Москве (рис. 5, 6). В этой связи, для эффективной борьбы с рассматриваемой проблемой, авторы предлагают использовать апробированный в Санкт-Петербурге опыт.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Низкий уровень теплоизоляции ограждающих конструкций неотапливаемых чердаков, отсутствие воздухообмена в требуемом объеме, несвоевремен-

ная уборка снега на скатных крышах способствуют повышению температуры воздуха в неотапливаемых чердачных помещениях, нарушению их ТВР, в результате чего создаются благоприятные условия для образования наледи на карнизных свесах и элементах водосточной системы зданий со скатной крышей и холодным чердаком.

На основании выполненного обследования чердачного помещения и сбора исходных данных составлено уравнение теплового баланса чердака, позволяющее с достаточной для инженерных расчетов точностью рассчитать температуру воздуха на чердаке.

Для уменьшения риска образования наледей на скатных крышах предложен комплекс инженерно-технических мероприятий, направленных на нормализацию ТВР.

Реализация предложенного комплекса мероприятий позволяет не только значительно снизить вероятность образования наледи на скатных крышах зданий и уменьшить интервал температур наружного воздуха, при которых существует риск появления свисающих наледей, но и сократить расход тепловой энергии в течение отопительного периода ввиду повышения уровня теплоизоляции ограждающих конструкций, отделяющих холодный чердак от отапливаемых помещений, а также улучшить параметры микроклимата на верхних этажах эксплуатируемых зданий.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горбунова Л.Н., Панова З.Н. Анализ методов и средств борьбы с наледью и сосульками // Вестник КрасГАУ. 2012. № 8 (71). С. 206–209.

2. Задорина Л.В., Муратова В.А., Зверев О.М. «Снеготряс» — устройство для удаления снега с наклонной кровли // Современные технологии

в строительстве. Теория и практика. 2019. Т. 2. С. 293–300.

3. Рудковская Н.Ю., Гайсин Е.Д., Волков А.А. Решение проблемы возникновения наледи и образования сосулек на скатных крышах жилых домов // Россия молодая : сб. мат. XII Всерос. науч.-практ.

конф. молодых ученых с междунар. участием. Кемерово, 2020. С. 42304.1–42304.3.

4. Исаева М.В. Борьба со снегом и гололедом на объектах городской инфраструктуры // Инновационный потенциал развития науки в современном мире: достижения и инновации : сб. ст. по мат. I Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 92–96.

5. Фролова И.Г., Синицин Д.А. Диагностика технического состояния зданий перед проведением капитального ремонта // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство : сб. ст. Самара : Самарский государственный технический университет, 2019. С. 802–808.

6. Ератова Ю.Е., Левшина Д.Э., Алескеров В.В. Рекомендации по повышению эксплуатационных свойств крыши здания // V Междунар. студенческий строит. форум-2020 : сб. докл. В 2-х т. Белгород, 2020. С. 137–140.

7. Старцев С.А. Проблемы обследования строительных конструкций, имеющих признаки биоповреждения // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 7 (17). С. 41–46.

8. Сулейманова Л.А., Медведев С.А. Анализ причин и способов реконструкции кровель гражданских зданий // Наука и инновации в строительстве : сб. докл. III Междунар. науч.-практ. конф. к 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. С. 271–275.

9. Кочеткова М.В., Гусев Н.И., Аюпова З.В. Сложность возведения ограждающих конструкций отапливаемых зданий // Региональная архитектура и строительство. 2015. № 3 (24). С. 55–58.

10. Горшков А.С. Причины образования ледяных дамб на крышах зданий // Кровельные и изоляционные материалы. 2014. № 6. С. 34–37.

11. Евстратов А.С., Макаров А.М. Факторы, влияющие на температурно-влажностный режим скатных крыш с холодным чердаком // Общество, современная наука и образование: проблемы и перспективы : сб. науч. тр. по мат. Междунар. науч.-практ. конф. : в 10 частях. 2012. С. 52–54.

12. Гусев Н.И., Кубасов Е.А. Конструктивные решения по предотвращению образования наледи на крышах // Региональная архитектура и строительство. 2011. № 1. С. 100–107.

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

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

15. Романова А.А., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Комплексное решение по устранению причин образования наледей на крышах зданий // Техно-технологические проблемы сервиса. 2015. № 3 (33). С. 15–19.

16. Гусев Н.И., Кубасов Е.А., Кочеткова М.В. Средства для удаления наледи с крыш // Региональная архитектура и строительство. 2011. № 2. С. 104–108.

17. Кочеткова М.В., Мишин А.А. Причины возникновения наледообразований на крышах // Современные научные исследования и инновации. 2017. № 2. С. 90–92.

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

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

20. Вавилин Е.В., Вавилин В.Ф., Вавилин В.В. Влияние формы и угла наклона скатов на задержание снега и образование наледи на чердачных крышах // Проблемы современной науки. 2017. № 28. С. 4–11.

21. Горшков А.С., Немова Д.В., Рымкевич П.П. Сравнительный анализ затрат тепловой энергии, эксплуатационных затрат на отопление и затрат топливно-энергетических ресурсов для многоквартирного жилого здания при различных минимальных требованиях к уровню тепловой защиты ограждающих конструкций // Кровельные и изоляционные материалы. 2013. № 2. С. 34–39.

22. Ватин Н.И., Немова Д.В., Горшков А.С. Сравнительный анализ потерь тепловой энергии и эксплуатационных затрат на отопление для загородного частного дома при различных минимальных требованиях к уровню тепловой защиты ограждающих конструкций // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2013. № 1 (168). С. 36–39.

23. Немова Д.В., Ватин Н.И., Горшков А.С., Кашибин А.В., Рымкевич П.П., Цейтин Д.Н. Технико-экономическое обоснование мероприятий по утеплению ограждающих конструкций индивидуального жилого дома // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 8 (23). С. 93–115.

24. Горшков А.С. Модель оценки прогнозируемого срока окупаемости инвестиций в энергосбережение // Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 136–146. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.12.136-146

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

26. Горшков А.С., Рымкевич П.П., Немова Д.В., Ватин Н.И. Экономическая эффективность инвестиций в энергосбережение // Инженерные системы. АВОК – Северо-Запад. 2014. № 3. С. 32–36.

27. Горшков А.С., Рымкевич П.П. Методика и пример расчета окупаемости инвестиций при реализации энергосберегающих мероприятий в строительстве // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2014. № 9 (188). С. 40–45.

28. Романова А.А., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Методика расчета прогнозируемых сроков окупаемости энергосберегающих мероприятий по утеплению зданий // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2014. № 4 (30). С. 68–74.

29. Смогунов В.В., Кочетков Д.В., Шорин В.А. Системный анализ методов и средств антиобледенения // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2014. № 4 (12). С. 146–154.

30. Желудков А.А., Кадыров Р.Н. Сезонные, водяные системы антиобледенения кровель и удаления снега // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018 : мат. IX Междунар. молодежной науч.-техн. конф. В 3-х т. 2018. С. 259–260.

31. Хлобыстин Н.С., Галкин Д.А. Инновационный подход к проблеме предотвращения образова-

ния наледи (сосулков) на крышах зданий // Безопасность в чрезвычайных ситуациях : сб. науч. Всерос. науч.-практ. конф. 2018. С. 219–225.

32. Либерман Я.Л., Горбунова Л.Н. Устройство для удаления сосулков по периметру кровли здания // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2012. № 4 (14). С. 8–11.

33. Сокова С.Д., Демидов А.С. Устранение наледей на карнизах металлических крыш // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2012. № 3 (27). С. 135–141.

34. Добрышкин А.В., Манаськин А.Н., Репин А.А., Малыгин А.Н. Создание устройства для предотвращения наледи на крышах зданий // Техническое творчество молодежи. 2017. № 3 (103). С. 43.

35. Труфанов А.В. Visual examination of building constructions: overlappings // Синергия наук. 2018. № 19. С. 694–701.

36. Gorshkov A.S., Vatin N.I., Rymkevich P.P. Climate change and the thermal island effect in the million-plus city // Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. Vol. 89. Pp. 8902–8902. DOI: 10.18720/CUBS.89.2

Поступила в редакцию 3 октября 2021 г.

Принята в доработанном виде 21 января 2022 г.

Одобрена для публикации 21 января 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: Ростислав Александрович Горшков — студент; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП); 190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А; РИНЦ ID: 1033779; rostalsgor@gmail.com;

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

Вклад авторов:

Горшков Р.А. — концепция исследования, сбор и обработка данных, написание исходного текста, разработка математической модели, выполнение расчетов.

Войлоков И.А. — научное руководство, развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Gorbunova L.N., Panova Z.N. Analysis of the techniques and means of fight with icing and icicles. *Bulletin of KrasSAU*. 2012; 8(71):206-209. (rus.).

2. Zadorina L.V., Muratova V.A., Zverev O.M. “Snowdrift” — device for removing snow from a sloping roof. *Modern Technologies in Construction. Theory and Practice*. 2019; 2:293-300. (rus.).

3. Rudkovskaya N.Yu., Gaisin E.D., Volkov A.A. Solving the problem of ice formation and the formation of icicles on the pitched roofs of residential buildings. *Young Russia: a collection of materials of the XII All-*

*Russian, scientific and practical conference of young scientists with international participation*. Kemerovo, 2020; 42304.1-42304.3. (rus.).

4. Isaeva M.V. Fighting snow and ice at urban infrastructure facilities. *Innovative potential for the development of science in the modern world: achievements and innovations: a collection of articles based on the materials of the 1st international scientific and practical conference*. 2019; 92-96. (rus.).

5. Frolova I.G., Sinitsin D.A. Diagnostics of technical condition of buildings before the overhaul. *Tradi-*

tions and Innovations in Construction and Architecture. *Construction: collection of articles*. Samara, Samara State Technical University, 2019; 802-808. (rus.).

6. Eratova Yu.E., Levshina D.E., Aleskerov V.V. Recommendations for improving the performance properties of the roof of a building. *V International Student Building Forum-2020: a collection of reports*. In 2 volumes. Belgorod, 2020; 137-140. (rus.).

7. Startsev S.A. Problems of examination of building structures with signs of biodamage. *Magazine of Civil Engineering*. 2010; 7(17):41-46. (rus.).

8. Suleymanova L.A., Medvedev S.A. Analysis of the causes and methods of reconstruction of roofs of civil buildings. *Science and Innovations in Construction: a collection of reports of the III International scientific and practical conference dedicated to the 65th anniversary of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019; 271-275. (rus.).

9. Kochetkova M.V., Gusev N.I., Ayupova Z.V. The complexity of the construction of building envelopes for heated buildings. *Regional Architecture and Engineering*. 2015; 3(24):55-58. (rus.).

10. Gorshkov A.S. The reasons for the ice dam formation on roofs. *Roofing and Insulation Materials*. 2014; 6:34-37. (rus.).

11. Evstratov A.S., Makarov A.M. Factors influencing the temperature and humidity regime of pitched roofs with a cold attic. *Society, Modern Science and Education: Problems and Prospects: a collection of scientific papers based on the materials of the International Scientific and Practical Conference: in 10 parts*. 2012; 52-54. (rus.).

12. Gusev N.I., Kubasov E.A. Constructive solutions to prevent the formation of ice on the roofs. *Regional Architecture and Engineering*. 2011; 1:100-107. (rus.).

13. Gorshkov A.S., Vatin N.I., Urustimov A.I., Rymkevich P.P. Calculation method for substantiation of technological measures to prevent the formation of ice dams on the roofs of buildings with a pitched roof. *Magazine of Civil Engineering*. 2012; 3(29):69-73. DOI: 10.5862/MCE.29.9 (rus.).

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

15. Romanova A.A., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. Complex decision for elimination of the ice formation reasons on the building roofs. *Technical and Technological Problems of Service*. 2015; 3(33):15-19. (rus.).

16. Gusev N.I., Kubasov E.A., Kochetkova M.V. Means for removing ice from roofs. *Regional Architecture and Construction*. 2011; 2:104-108. (rus.).

17. Kochetkova M.V., Mishin A.A. Reasons for the formation of ice on the roof. *Modern Scientific Research and Innovations*. 2017; 2:90-92. (rus.).

18. Vatin N., Gorshkov A., Dadchenko A., Rymkevich P., Olshevskiy V. The method and computation of air change required for attic rooms. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2012; (53):50-60. DOI: 10.18720/CUBS.53.4

19. Gorshkov A.S., Dadchenko A.Yu., Olshevskiy V.Ya., Rymkevich P.P. Assessment of air required for normalization of temperature and humidity conditions of the cold attics. *Roofing and Insulation Materials*. 2016; 4:33-36. (rus.).

20. Vavilin E.V., Vavilin V.F., Vavilin V.V. Influence of the shape and angle of inclination of the slopes on the retention of snow and the formation of ice on attic roofs. *Problems of Modern Science*. 2017; 28:4-11. (rus.).

21. Gorshkov A.S., Nemova D.V., Rymkevich P.P. Comparative cost analysis of thermal energy, operating costs and the cost of heating fuel and energy for multi-family residential buildings with different minimum requirements for the level of thermal protection enclosures. *Roofing and Insulation Materials*. 2013; 2:34-39. (rus.).

22. Vatin N.I., Nemova D.V., Gorshkov A.S. A comparative analysis of thermal energy losses and operating costs for the country private house heating with minimum requirements to the level of thermal protection of fencing structure. *Building Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century*. 2013; 1(168):36-39. (rus.).

23. Nemova D.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S., Kashabin A.V., Rymkevich P.P., Tseitin D.N. Technical and economic assessment on actions for heat insulation of external envelopes of an individual house. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014; 8(23):93-115. (rus.).

24. Gorshkov A.S. Model of evaluating the projected payback period in energy preservation. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2015; 12:136-146. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.12.136-146 (rus.).

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

26. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P., Nemova D.V., Vatin N.I. Economic efficiency of investments in energy saving. *Engineering Systems. ABOK – Northwest*. 2014; 3:32-36. (rus.).

27. Gorshkov A.S., Rymkevich P.P. Methodology and sample calculation of roi when implementing energy saving measures in building. *Building Materials, Equipment, Technologies of the XXI Century*. 2014; 9(188):40-45. (rus.).

28. Romanova A.A., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. Calculating methods for the projected pay-

back of energy-saving measures for buildings insulation. *Technical and Technological Problems of Service*. 2014; 4(30):68-74. (rus.).

29. Smogunov V.V., Kochetkov D.V., Shorin V.A. System analysis of deicing methods and means. *Models, Systems, Networks in Economics, Engineering, Nature and Society*. 2014; 4(12):146-154. (rus.).

30. Zheludkov A.A., Kadyrov R.N. Seasonal, water systems for anti-icing of roofs and snow removal. *Power Industry Through the Eyes of Youth – 2018: materials of the IX International Youth Scientific and Technical Conference. In 3 volumes*. 2018; 259-260. (rus.).

31. Khlobystin N.S., Galkin D.A. Innovative approach to the problem of prevention of frost (icicles) on the roofs of buildings. *Security in Emergency Situations: a collection of scientific All-Russian scientific and practical conference*. 2018; 219-225. (rus.).

32. Lieberman J.L., Gorbunova L.N. Device for removing icicles on the perimeter of the roof

of the building. *Engineering Industry and Life Safety*. 2012; 4(14):8-11. (rus.).

33. Sokova S.D., Demidov A.S. Ice crust removing on the cornices of metal roofs. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2012; 3(27):135-141. (rus.).

34. Dobryshkin A.V., Manaskin A.N., Repin A.A., Malykhin A.N. Creation of a device to prevent ice on the roofs of buildings. *Technical Creativity of Youth*. 2017; 3(103):43. (rus.).

35. Trufanov A.V. Visual examination of building constructions: overlappings. *Synergy of Sciences*. 2018; 19:694-701. (rus.).

36. Gorshkov A.S., Vatin N.I., Rymkevich P.P. Climate change and the thermal island effect in the million-plus city. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020; 89:8902-8902. DOI: 10.18720/CUBS.89.2

Received October 3, 2021.

Adopted in revised form on January 21, 2022.

Approved for publication on January 21, 2022.

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

Ilya A. Voilokov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU); 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RISC: 546991; i.voilokov@outlook.com.

*Contribution of the authors:*

Gorshkov R.A. — conceptualization, data gathering and processing, writing of the article, development of a mathematical model, calculations.

Voilokov I.A. — supervision, methodology, scientific editing of the text, final conclusions.

The authors declare no conflicts of interest.

## Создание опорной геодезической сети на оползневых склонах в виде замкнутых полигонометрических четырехугольников

Владимир Викторович Симонян<sup>1</sup>, Виктор Иванович Волков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;*

<sup>2</sup> *Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
(СПбГАСУ); г. Санкт-Петербург, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проведен анализ опорной геодезической сети в виде замкнутого полигонометрического четырехугольника, созданного на Карамышевском оползневом склоне в Москве для повторных геодезических наблюдений за смещениями оползня. Цель исследования — показать, что построение опорной геодезической сети на оползневых склонах в виде замкнутых полигонометрических четырехугольников может иметь место наряду с другими линейно-угловыми методами.

**Материалы и методы.** Полевые измерения выполняются точными, либо высокоточными электронными тахеометрами Leica, Sokkia, Topcon и др. При этом подлежат измерению все четыре угла и четыре стороны. В данном полигоне полигонометрии имеются три избыточных измерения, что позволяет надежно контролировать качество полевых работ. Уравнивание этого полигона целесообразно выполнять коррелятным способом метода наименьших квадратов (МНК) по двум причинам: 1) для вычисления допустимых невязок необходимо составить соответствующее условное уравнение, т.е. выполнить самую важную и трудоемкую часть алгоритма коррелятного способа; 2) коррелятный способ позволяет получать в ходе реализации алгоритма обратные веса уравниваемых измерений, сравнение которых с обратными весами неуровненных измерений дает наглядное представление о качестве геометрии запроектированной сети.

**Результаты.** Математическая обработка результатов геодезических измерений опорной сети в виде замкнутых полигонометрических четырехугольников по МНК сложна и требует применения компьютерной техники и соответствующего программного обеспечения. Но при их наличии задача решается однозначно и, главное, с высокой точностью.

**Выводы.** Построение опорных геодезических сетей в виде замкнутых полигонометрических четырехугольников для наблюдений за смещениями оползней можно рекомендовать и для других оползневых склонов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** оползень, склон, опорная сеть, точность, измерения, уравнивание, коррелятный способ, метод наименьших квадратов

*Благодарности.* Авторы выражают благодарность рецензентам.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Симонян В.В., Волков В.И. Создание опорной геодезической сети на оползневых склонах в виде замкнутых полигонометрических четырехугольников // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 1. С. 72–82. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.72-82

*Автор, ответственный за переписку:* Владимир Викторович Симонян, simonyan.vladimir55@gmail.com.

## The establishment of a reference geodetic network made of closed polygonometric quadrangles and designated for landslide slopes

Vladimir V. Simonyan<sup>1</sup>, Victor V. Volkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)  
(MGSU); Moscow, Russian Federation;*

<sup>2</sup> *Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);  
Saint Petersburg, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** A reference geodetic network in the form of a closed polygonometric quadrangle is established at the Karamyshevsky landslide slope in Moscow for the purpose of repeated geodetic observations of landslide displacements. The purpose of the study is to show that the reference geodetic network in the form of closed polygonometric quadrangles can be implemented for landslide slopes along with other linear and angular methods.

**Materials and methods.** Accurate or high-precision electronic total stations, such as Leica, Sokkia, Topcon, etc. are used to take field measurements. In this case, all four corners and all four sides are to be measured. There are three redundant measurements in this polygon of polygonometry to ensure the reliable control of the field work quality. It is advisable to equalize this polygon using the correlate type of the least squares method for the two reasons. First, to calculate the acceptable residuals, it is necessary to make an appropriate conditional equation, i.e. implement the most important and time-consuming part of the correlate method algorithm. Second, in the process of the algorithm implementation, the correlate method allows to obtain the inverse weights of equalized measurements, whose comparison with the inverse weights of unbalanced measurements provides a visual representation of the quality of the geometry of the designed network.

**Results.** The mathematical processing of the results of geodetic measurements of the reference network in the form of closed polygonometric quadrangles using the method of least squares is quite complex and requires a computer technology and appropriate software. However if they are available, the problem is solved unambiguously and very accurately, which particularly important.

**Conclusions.** The construction of reference geodetic networks in the form of closed polygonometric quadrangles for observing landslide displacements can be recommended for other landslide slopes.

**KEYWORDS:** landslide, slope, reference network, accuracy, measurements, equalization, correlation method, least squares method

*Acknowledgments:* The authors are grateful to the reviewers.

**FOR CITATION:** Simonyan V.V., Volkov V.V. The establishment of a reference geodetic network made of closed polygonometric quadrangles and designated for landslide slopes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(1):72-82. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.72-82 (rus.).

*Corresponding author:* Vladimir V. Simonyan, simonyan.vladimir55@gmail.com.

## ВВЕДЕНИЕ

Среди способов построения геодезических сетей наибольшую точность имеют линейно-угловые сети, т.е. самым оптимальным решением по созданию опорной геодезической сети на оползневых склонах шириной до пятисот метров являются замкнутые полигонометрические четырехугольники. Эти опорные сети должны обеспечить наблюдения за деформационной оползневой сетью, а также за деформациями сооружений, находящихся на оползнях.

Отсюда вытекают задачи, которые требуют решения:

- типовая схема построения опорной сети;
- предрасчет точности определения положения пунктов опорной сети;
- методика полевых работ;
- полевые измерения;
- уравнивание сети;
- оценка точности сети.

Исследованиям по математической обработке геодезических сетей, в том числе и на оползневых склонах, посвящено большое количество литературы как в нашей стране, так и за рубежом [1–20]. Однако главным образом они основаны на традиционных методах уравнивания геодезических сетей.

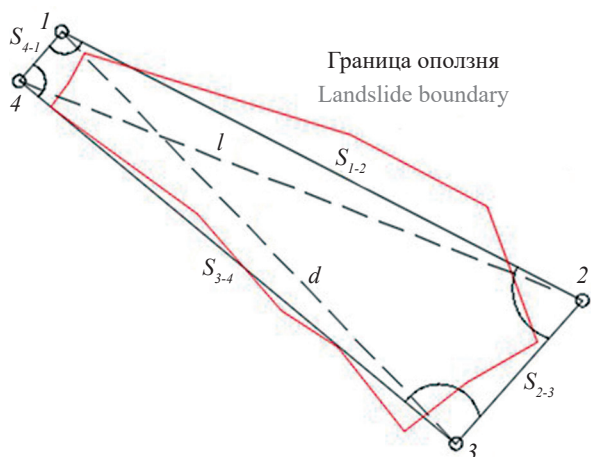
Уравнивание геодезических сетей — важнейший этап их создания, возникает в том случае, когда в наличии есть дополнительные (избыточные измерения). Главная задача уравнивания — получить однозначные результаты по отягощенным погрешностями измерениям, но исправленным в ходе обработки таким образом, чтобы точность всех величин не понизилась, а наоборот, стала выше. Эта задача решается методом наименьших квадратов (МНК). Известно несколько способов уравнивания. Основные — параметрический и коррелятный способы.

При параметрическом способе уравнивания число совместно решаемых уравнений равно числу определяемых неизвестных  $k$  (для одиночного полигонометрического хода, имеющего десять определяемых точек, придется решать двадцать уравнений). При коррелятном способе число совместно решаемых уравнений равно числу избыточных измерений  $r$  (для одиночного полигонометрического хода таких уравнений будет всего три). Коррелятный способ практически применим к небольшим сетям, когда в геодезической сети сравнительно просто сформировать геометрические условия.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полученные результаты геодезических измерений дают возможность урвать сеть и получить координаты пунктов этой сети с оценкой точности. Пример уравнивания такой сети выполним на конкретном примере оползневого склона Карамышевской набережной (красным цветом показан контур оползня) (рис.).

Подлежат измерению все четыре угла и четыре стороны. В данном полигоне полигонометрии имеются три избыточных измерения, что позволяет надежно контролировать качество полевых работ. Уравнивание этого полигона целесообразно выполнять коррелятным способом МНК по двум причинам. Во-первых, для вычисления допустимых невязок необходимо составить соответствующее условное уравнение, т.е. выполнить самую важную и трудоемкую часть алгоритма коррелятного способа. Во-вторых, коррелятный способ позволяет получать в ходе реализации алгоритма обратные веса уравненных измерений, сравнение которых с обратными весами неуравненных измерений дает наглядное представление о качестве геометрии запроектированной сети.



Опорная сеть с неизмеряемыми диагоналями  $l$  и  $d$  на оползневом склоне Карамышевской набережной (1–4 — пункты опорной сети)

A reference network featuring unmeasurable diagonals  $l$  and  $d$  on the landslide slope of the Karamyshevskaya embankment (1–4 are the points of the reference network)

Для целостного изложения методики геодезического мониторинга склоновых территорий нам придется останавливаться и на известных в геодезии теоретических положениях. В связи с этим ниже приведем строгий алгоритм коррелятного способа уравнивания метода наименьших квадратов применительно к сети (рис.).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе измерений получены следующие результаты:

- углы:  $\beta_1 = 103^\circ 16' 26''$ ;  
 $\beta_2 = 75^\circ 52' 55''$ ;  
 $\beta_3 = 91^\circ 43' 31''$ ;  
 $\beta_4 = 89^\circ 07' 11''$ ;
- длины сторон:  $S_{1-2} = 375,540$  м;  
 $S_{2-3} = 122,810$  м;  
 $S_{3-4} = 363,741$  м;  
 $S_{4-1} = 42,163$  м.

При коррелятном способе три условных уравнения поправок в измерения (одно углов и два диагоналей) имеют вид (1):

$$\sum_1^4 v_\beta + W_\beta = 0,$$

$$v_{l_1} - v_{l_2} = 0,$$

$$v_{d_1} - v_{d_2} = 0.$$

(1)

$$R_{38} = \begin{pmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +\frac{1}{\rho A_1} & 0 & -\frac{1}{\rho A_3} & 0 & +\frac{C_1}{A_1} & -\frac{C_3}{A_3} & -\frac{B_3}{A_3} & +\frac{B_1}{A_1} \\ 0 & +\frac{1}{\rho A_2} & 0 & -\frac{1}{\rho A_4} & +\frac{B_2}{A_2} & +\frac{C_2}{A_2} & -\frac{B_4}{A_4} & -\frac{C_4}{A_4} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

С учетом фундаментального уравнения трилатерации [9, 10] (2)

$$\frac{v_{\beta_{\text{выч}}}}{\rho} = A_\beta v_a - B_\beta v_b - C_\beta v_c, \quad (2)$$

в которой коэффициенты  $A_\beta, B_\beta, C_\beta$  соответственно равны (3):

$$A_\beta = \frac{1}{h_a} = \frac{a}{bc \sin \beta},$$

$$B_\beta = \sqrt{A_\beta^2 - \frac{1}{b^2}}, \quad (3)$$

$$C_\beta = \sqrt{A_\beta^2 - \frac{1}{c^2}},$$

где  $h_a$  — высота треугольника, проведенная из вершины угла  $\beta$  на противоположную сторону  $a$ , линейные условные уравнения примут вид (4):

$$\frac{1}{\rho A_1} v_1 + \frac{B_1}{A_1} v_{s_4} + \frac{C_1}{A_1} v_{s_1} - \frac{1}{\rho A_3} v_3 - \frac{B_3}{A_3} v_{s_3} - \frac{C_3}{A_3} v_{s_2} + W_{2-4} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{1}{\rho A_2} v_2 + \frac{B_2}{A_2} v_{s_1} + \frac{C_2}{A_2} v_{s_2} - \frac{1}{\rho A_4} v_4 - \frac{B_4}{A_4} v_{s_3} - \frac{C_4}{A_4} v_{s_4} + W_{1-3} = 0.$$

Угловая невязка вычисляется по формуле (5)

$$W_\beta = \sum_1^4 \beta_i - 360^\circ, \quad (5)$$

а допустимое значение угловой невязки (6)

$$W_{\beta_{\text{доп}}} = 2m_\beta \sqrt{n}. \quad (6)$$

Линейные (диагональные) невязки равны (7)

$$W_l = l_1 - l_2, \quad (7)$$

$$W_d = d_1 - d_2,$$

а допустимое значение линейной невязки (8)

$$W_{\text{доп}} = 2\mu \sqrt{\sum R_i^2}, \quad (8)$$

где  $l_1, l_2, d_1, d_2$  — длины диагоналей, вычисленные из соответствующих противолежащих треугольников;  $\mu = m_s$  — средняя квадратическая погрешность (СКП) единицы веса, которая при априорной оценке точности берется по паспортным данным тахеометра (в данном случае равна 2 мм);  $R_i$  — коэффициенты соответствующего условного уравнения поправок в измерения.

Составим таблицу коэффициентов условных уравнений (табл. 1).

В матричной форме это выглядит следующим образом (9):

**Табл. 1.** Таблица коэффициентов условных уравнений  
**Table 1.** The table of coefficients of conditional equations

$v_{\beta_1}$	$v_{\beta_2}$	$v_{\beta_3}$	$v_{\beta_4}$	$v_{S_1}$	$v_{S_2}$	$v_{S_3}$	$v_{S_4}$
+1	+1	+1	+1	0	0	0	0
$+\frac{1}{\rho A_1}$	0	$-\frac{1}{\rho A_3}$	0	$+\frac{C_1}{A_1}$	$-\frac{C_3}{A_3}$	$-\frac{B_3}{A_3}$	$+\frac{B_1}{A_1}$
0	$+\frac{1}{\rho A_2}$	0	$-\frac{1}{\rho A_4}$	$+\frac{B_2}{A_2}$	$+\frac{C_2}{A_2}$	$-\frac{B_4}{A_4}$	$-\frac{C_4}{A_4}$

По теореме косинусов дважды вычислим диагонали  $l$  и  $d$  (рис.):

- диагональ  $l$  вычислим из треугольника 4–1–2, а затем из треугольника 2–3–4;
- диагональ  $d$  вычислим из треугольника 3–4–1 и из треугольника 1–2–3 (10)

$$\begin{aligned} l_{4-1-2}^2 &= S_{4-1}^2 + S_{1-2}^2 - 2S_{4-1}S_{1-2} \cos \beta_1, \\ l_{2-3-4}^2 &= S_{2-3}^2 + S_{3-4}^2 - 2S_{2-3}S_{3-4} \cos \beta_3, \\ d_{3-4-1}^2 &= S_{3-4}^2 + S_{4-1}^2 - 2S_{3-4}S_{4-1} \cos \beta_4, \\ d_{1-2-3}^2 &= S_{1-2}^2 + S_{2-3}^2 - 2S_{1-2}S_{2-3} \cos \beta_2. \end{aligned} \quad (10)$$

С учетом результатов полевых измерений имеем:

$$\begin{aligned} l_1 &= \sqrt{42,163^2 + 375,540^2 - 2 \cdot 42,163 \cdot 375,540 \cdot \cos 103^\circ 16' 26''} = 387,40048 \text{ м}; \\ l_2 &= \sqrt{122,810^2 + 363,741^2 - 2 \cdot 122,810 \cdot 363,741 \cdot \cos 91^\circ 43' 31''} = 387,40115 \text{ м}; \\ d_1 &= \sqrt{363,741^2 + 42,163^2 - 2 \cdot 363,741 \cdot 42,163 \cdot \cos 89^\circ 07' 11''} = 365,53249 \text{ м}; \\ d_2 &= \sqrt{375,540^2 + 122,810^2 - 2 \cdot 375,540 \cdot 122,810 \cdot \cos 75^\circ 52' 55''} = 365,53155 \text{ м}. \end{aligned}$$

По формулам (3) вычислим коэффициенты фундаментального уравнения трилатерации и контролируем их по формуле (11)

$$A_\beta a - B_\beta b - C_\beta c = 0. \quad (11)$$

Получим (рис.):

$$A_1 = 2,51381; B_1 = 0,83311; C_1 = 2,49967.$$

$$\text{Контроль: } 2,51381 \cdot 3,8740048 - 0,83311 \cdot 0,42163 - 2,49967 \cdot 3,75540 = 0.$$

$$A_2 = 0,81725; B_2 = 0,77265; C_2 = 0,06977.$$

$$R_{38} = \begin{pmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +0,1929 & 0 & -0,5588 & 0 & +0,994 & -0,948 & -0,345 & +0,331 \\ 0 & +0,5932 & 0 & -0,2034 & +0,945 & +0,0854 & -0,993 & -0,100 \end{pmatrix}.$$

Искомый вектор поправок выглядит следующим образом (12):

$$V_{81} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ v_7 \\ v_8 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Система условных уравнений поправок будет (13)

$$R_{38} V_{81} + W_{31} = 0, \quad (13)$$

$$\text{Контроль: } 0,81725 \cdot 3,6553155 - 0,77265 \cdot 3,75540 - 0,06977 \cdot 1,22810 = 0.$$

$$A_3 = 0,86762; B_3 = 0,29956; C_3 = 0,82291.$$

$$\text{Контроль: } 0,86762 \cdot 3,8740012 - 0,29956 \cdot 1,22810 - 0,82291 \cdot 3,63741 = 0.$$

$$A_4 = 2,38371; B_4 = 2,36780; C_4 = 0,23851.$$

$$\text{Контроль: } 2,38371 \cdot 3,6553249 - 2,36780 \cdot 3,63741 - 0,23851 \cdot 0,42163 = 0.$$

Тогда (9) будет:

в которой вектор невязок  $W_{31}$  равен (14)

$$W_{31} = \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Подставляя данные измерений в формулы (5) и (7), найдем невязки  $W_i$ :

$$W_\beta = 103^\circ 16' 26'' + 75^\circ 52' 55'' + 91^\circ 43' 31'' + 89^\circ 07' 11'' - 360^\circ 00' 00'' = +3'',$$

$$W_l = 387,40048 \text{ м} - 387,40115 \text{ м} = -0,67 \text{ мм};$$

$$W_d = 365,53249 \text{ м} - 365,53155 \text{ м} = +0,94 \text{ мм}.$$

Допустимые значения невязок:

$$W_{\text{доп}} = 2 \cdot 2'' \cdot \sqrt{4} = 8'';$$

$$\sum R_i^2 = \sqrt{0,19^2 + 0,56^2 + 0,99^2 + 0,95^2 + 0,34^2 + 0,33^2} = \sqrt{2,46},$$

$$\sum R_d^2 = \sqrt{0,59^2 + 0,20^2 + 0,94^2 + 0,085^2 + 0,99^2 + 0,10^2} = \sqrt{2,29}.$$

$$W_{l_{\text{зот}}} = 2 \cdot 2 \text{ мм} \sqrt{2,46} = 6,3 \text{ мм};$$

$$W_{l_{\text{зот}}} = 2 \cdot 2 \text{ мм} \sqrt{2,29} = 6,1 \text{ мм}.$$

Тогда вектор невязок  $W_{31}$  равен:

$$W_{31} = \begin{pmatrix} +3 \\ -0,67 \\ +0,94 \end{pmatrix}.$$

Для дальнейших вычислений образуем транспонированную матрицу коэффициентов условных уравнений:

$$R_{83}^T = \begin{pmatrix} +1 & +0,1929 & 0 \\ +1 & 0 & +0,5932 \\ +1 & -0,5588 & 0 \\ +1 & 0 & -0,2034 \\ 0 & +0,994 & +0,945 \\ 0 & -0,948 & +0,0854 \\ 0 & -0,345 & -0,993 \\ 0 & +0,331 & -0,100 \end{pmatrix}.$$

Следуя алгоритму метода наименьших квадратов, для решения условных уравнений поправок (13) перейдем к нормальным уравнениям (15)

$$N_{33} k_{31} + W_{31} = 0, \quad (15)$$

где  $N_{33}$  — матрица коэффициентов для нормальных уравнений, равная (16)

$$N_{33} = R_{38} R_{83}^T, \quad (16)$$

$k$  — коррелата (неопределенный множитель Лагранжа), равная (17)

$$k_{31} = -N_{33}^{-1} W_{31}, \quad (17)$$

$N_{33}^{-1}$  — обратная матрица коэффициентов нормальных уравнений, т.е. матрица, отвечающая условию (контроль матрицы  $N_{33}^{-1}$ ) (18)

$$N_{33}^{-1} N_{33} = E. \quad (18)$$

Найдем матрицу  $N_{33}$ , равную произведению матриц  $R_{38}$  и  $R_{83}^T$ . Получим:

$$N_{33} = \begin{pmatrix} +4 & -0,366 & +0,390 \\ -0,366 & +2,465 & +1,168 \\ +0,390 & +1,168 & +2,290 \end{pmatrix}.$$

$$E = \begin{pmatrix} +0,266 & +0,803 & -0,0862 \\ +0,0803 & +0,559 & -0,299 \\ -0,0862 & -0,299 & +0,604 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +4 & -0,366 & +0,390 \\ -0,366 & +2,465 & +1,168 \\ +0,390 & +1,168 & +2,290 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Коррелаты  $k_{31}$  найдем из (17)

$$k_{31} = - \begin{pmatrix} +0,266 & +0,803 & -0,0862 \\ +0,0803 & +0,559 & -0,299 \\ -0,0862 & -0,299 & +0,604 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +3 \\ -0,67 \\ +0,94 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,633 \\ +0,415 \\ -0,509 \end{pmatrix}.$$

Систему коррелятных уравнений поправок определим по следующему выражению (19):

$$V_{81} = R_{83}^T k_{31}, \quad (19)$$

где  $k_{31}$  — коррелаты.

В системе уравнений (19) восемь неизвестных поправок и три неизвестных коррелаты, а число уравнений в системе равно восьми. В связи с этим система имеет бесчисленное множество решений. Для однозначного решения системы на искомые поправки наложим дополнительное условие  $[pV^2] = \min$  или в матричной форме  $V^T p V = \min$ , которое позволяет получить уравненные значения измеренных величин с максимально возможным весом [2, 3, 9].

Поскольку за «СКП единицы веса» приняли равноточно измеренные стороны ( $P_S = 1$ ), то веса измеренных углов  $\beta_j$ , вычисляемые по формуле (20),

$$P_{\beta_{\text{изм}}} = \left( \frac{m_S (\text{мм})}{m_{\beta_{\text{изм}}} (\text{сек})} \right)^2 \quad (20)$$

будут равны  $P_{\beta} = 1$  мм/сек. Тогда, соответственно,

$$\text{обратные веса } Q_S = \frac{1}{P_S} \text{ и } Q_{\beta} = \frac{1}{P_{\beta} (\text{мм/сек})}.$$

Подставив (19) в (13), получим систему нормальных уравнений коррелат (21)

$$R_{38} R_{83}^T k_{31} + W_{31} = 0, \quad (21)$$

или с учетом (16) будет (22)

$$N_{33} k_{31} + W_{31} = 0. \quad (22)$$

Найдем обратную матрицу  $N_{33}^{-1}$ :

$$N_{33}^{-1} = \begin{pmatrix} +0,266 & +0,803 & -0,0862 \\ +0,0803 & +0,559 & -0,299 \\ -0,0862 & -0,299 & +0,604 \end{pmatrix}.$$

Произведение матрицы  $N_{33}$  на обратную  $N_{33}^{-1}$  дает единичную матрицу  $E$  (формула (18)). Подстановка данных дает следующий результат

Из (19) найдем вектор поправок

$$V_{81} = \begin{pmatrix} +1 & +0,1929 & 0 \\ +1 & 0 & +0,5932 \\ +1 & -0,5588 & 0 \\ +1 & 0 & -0,2034 \\ 0 & +0,994 & +0,945 \\ 0 & -0,948 & +0,085 \\ 0 & -0,345 & -0,993 \\ 0 & +0,331 & -0,100 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -0,633 \\ +0,415 \\ -0,509 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,583 \\ -0,965 \\ -0,895 \\ -0,560 \\ -0,0693 \\ -0,437 \\ +0,363 \\ +0,188 \end{pmatrix}.$$

Контроль уравнивания выполним подстановкой уравниваемых значений результатов измерений в условные уравнения (13). В правой части должны получиться нули.

$$\begin{pmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +0,1929 & 0 & -0,5588 & 0 & +0,994 & -0,948 & -0,345 & +0,331 \\ 0 & +0,5932 & 0 & -0,2034 & +0,945 & +0,085 & -0,993 & -0,100 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -0,583 \\ -0,965 \\ -0,895 \\ -0,560 \\ -0,0693 \\ -0,437 \\ +0,363 \\ +0,188 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} +3 \\ -0,67 \\ +0,94 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Вычислим уравниваемые значения измеренных величин и их функций. Уравниваемые значения измеренных величин рассчитаем по формуле (23) [2]

$$\bar{\lambda}_i = \lambda_i + V_i. \quad (23)$$

Получим:

$$\bar{\beta}_1 = 103^\circ 16' 26'' - 0,58'' = 103^\circ 16' 25,42'';$$

$$\bar{\beta}_2 = 75^\circ 52' 55'' - 0,96'' = 75^\circ 52' 54,04'';$$

$$\bar{\beta}_3 = 91^\circ 43' 31'' - 0,90'' = 91^\circ 43' 30,10'';$$

$$\bar{\beta}_4 = 89^\circ 07' 11'' - 0,56'' = 89^\circ 07' 10,44'';$$

$$\bar{S}_{1-2} = 375,540 \text{ м} - 0,1 \text{ мм} = 375,5399 \text{ м};$$

$$\bar{S}_{2-3} = 122,810 \text{ м} - 0,4 \text{ мм} = 122,8096 \text{ м};$$

$$\bar{S}_{3-4} = 363,741 \text{ м} + 0,4 \text{ мм} = 363,7414 \text{ м};$$

$$\bar{S}_{4-1} = 42,163 \text{ м} + 0,2 \text{ мм} = 42,1632 \text{ м}.$$

Перейдем к апостериорной оценке точности и вычислим СКП единицы веса  $\mu$  и ее надежность  $m_\mu$  по формулам (24):

$$\mu = \sqrt{\frac{[pV^2]}{r}}, \quad m_\mu = \frac{\mu}{\sqrt{2r}}, \quad (24)$$

где  $r$  — число избыточных измерений ( $r = 3$ ).

Получим

$$\mu = \sqrt{\frac{2,743}{3}} = 0,96 \text{ мм} = 1,0 \text{ мм},$$

$$m_\mu = \frac{0,96}{\sqrt{6}} = 0,4 \text{ мм}.$$

Для определения весов функций уравниваемых значений измеренных величин и вычисления среднеквадратических погрешностей функций уравниваемых значений измеренных величин необходимо по уравниваемым значениям получить координаты пунктов опорной сети. Значения уравниваемых координат пунктов приведены в табл. 2.

Оценку точности опорной сети  $m_F$  выполним по формуле (25)

$$m_F = \mu \sqrt{Q_F}, \quad (25)$$

где  $\mu$  — СКП единицы веса;  $Q_F$  — обратный вес функции.

Обратный вес функции вычислим по формуле (26)

$$Q_F = f Q_{yp} f^T = \begin{pmatrix} Q_X & Q_{XY} \\ Q_{XY} & Q_Y \end{pmatrix}, \quad (26)$$

где  $f$  — вектор коэффициентов заданной функции (выраженный в линейной форме);  $Q_{yp}$  — матрица обратных весов уравниваемых измерений;  $f^T$  — транспонированный вектор  $f$ .

Наиболее удаленным пунктом сети от исходного является пункт 3. Матрица  $f$  коэффициентов оцениваемых функций — координат  $X, Y$  пункта 3 (относительно исходного пункта 1 и исходного направления 1–2. За исходное направление 1–2 всегда следует выбирать наиболее длинную сторону четырехугольника):

- явный вид функций (27)

$$\begin{aligned} F_X &= S_{1-2} \cos \alpha_{1-2} + S_{2-3} \cos(\alpha_{1-2} + 180^\circ - \beta_2); \\ F_Y &= S_{1-2} \sin \alpha_{1-2} + S_{2-3} \sin(\alpha_{1-2} + 180^\circ - \beta_2). \end{aligned} \quad (27)$$



- матрицу обратных весов уравненных результатов измерений (29)

$$Q_{\text{уп}} = \begin{pmatrix} +3,682 & -0,196 & -0,176 & -0,311 & -0,051 & +0,191 & -0,078 & +0,077 \\ -0,196 & +3,624 & -0,269 & -0,159 & -0,161 & -0,115 & +0,237 & +0,059 \\ -0,176 & -0,269 & +3,649 & -0,205 & +0,154 & -0,227 & +0,00025 & +0,085 \\ -0,311 & -0,159 & -0,205 & +3,674 & +0,057 & +0,152 & -0,159 & -0,068 \\ -0,051 & -0,161 & +0,154 & +0,057 & +0,470 & +0,236 & +0,366 & -0,063 \\ +0,191 & -0,115 & -0,227 & +0,152 & +0,236 & +0,445 & +0,141 & +0,217 \\ -0,078 & +0,237 & +0,00025 & -0,159 & +0,366 & +0,141 & +0,543 & -0,084 \\ +0,077 & +0,059 & +0,085 & -0,068 & -0,063 & +0,217 & -0,084 & +0,913 \end{pmatrix}.$$

По формуле (26) получим матрицу обратных весов весовых функций — координат  $X$  и  $Y$  пункта 3

$$Q_F = \begin{pmatrix} +1,533 & +0,262 \\ +0,262 & +0,384 \end{pmatrix}.$$

По главной диагонали стоят значения обратных весов координат  $X$ ,  $Y$  пункта 3 ( $Q_X = 1,5333$  и  $Q_Y = 0,384$ ). Не диагональные элементы — корреляционные отношения координат пункта 3.

Выполним оценку точности сети. Найдем среднеквадратические погрешности координат  $m_X$  и  $m_Y$  пункта 3:

$$m_X = \mu \sqrt{Q_X} = 1,0 \text{ мм} \sqrt{1,533} = 1,2 \text{ мм};$$

$$m_Y = \mu \sqrt{Q_Y} = 1,0 \text{ мм} \sqrt{0,384} = 0,6 \text{ мм}.$$

Точечная оценка положения пункта 3 будет

$$M_3 = \sqrt{m_X^2 + m_Y^2 - 2m_X m_Y} = \\ = \sqrt{1,2^2 + 0,6^2 - 2 \cdot 1,2 \cdot 0,6} = 0,6 \text{ мм}.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из предыдущих расчетов, математическая обработка результатов геодезических измерений опорной сети по МНК довольно сложна и требует применения компьютерной техники и соответствующего программного обеспечения. Но при их наличии задача решается однозначно и, главное, с высокой точностью.

Можно было, конечно, уравнивать эту сеть методом наименьших квадратов, как обычный полигонометрический ход, в программе Credo\_Dat 3.0. Тогда поправки в углы и в длины линий будут:

$$V_1 = -1''; V_2 = 0''; V_3 = -1''; V_4 = -1''; \\ V_{S_{1-2}} = 0 \text{ мм}; V_{S_{2-3}} = 0 \text{ мм}; V_{S_{3-4}} = 0 \text{ мм}; V_{S_{4-1}} = 0 \text{ мм}.$$

Уравненные значения измеренных величин следующие:

$$\bar{\beta}_1 = 103^\circ 16' 25''; \bar{\beta}_2 = 75^\circ 52' 55''; \bar{\beta}_3 = 91^\circ 43' 30''; \\ \bar{\beta}_4 = 89^\circ 07' 10'';$$

$$\bar{S}_{1-2} = 375,540 \text{ м}; \bar{S}_{2-3} = 122,810 \text{ м}; \bar{S}_{3-4} = \\ = 363,741 \text{ м}; \bar{S}_{4-1} = 42,163 \text{ м}.$$

Значения уравненных координат пунктов при-

Табл. 3. Уравненные координаты пунктов опорной сети

Table 3. The equalized coordinates of the points of the reference network

Пункты Points	$X$ , м / m	$Y$ , м / m
1	+12 329,713	-2871,100
2	+12 158,594	-2536,812
3	+12 066,225	-2617,747
4	+12 297,596	-2898,416

ведены в табл. 3.

Оценка точности сети: среднеквадратические погрешности координат  $m_X$  и  $m_Y$  пункта 3

$$m_X = 1 \text{ мм}; m_Y = 1 \text{ мм}.$$

Точечная оценка положения пункта 3 будет

$$M_3 = 1,4 \text{ мм}.$$

Сравнивая СКП точки 3, замечаем, что погрешность точки 3 в первом способе уравнивания в 2,3 раза меньше, чем во втором, что вызвано большей жесткостью уравнивания сети.

Таким образом, замкнутые полигонометрические четырехугольники можно рекомендовать для построения опорной геодезической сети на оползневых склонах.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Асташенков Г.Г., Барлиани А.Г., Колмогоров В.Г. Коррелятная версия уравнивания и оценки точности геодезических сетей с равноточно

измеренными величинами методом псевдооптимизации // Вестник СГУГиТ. 2016. № 4 (36). С. 52–65.

2. Батраков Ю.Г. Геодезические сети специального назначения. М. : Картгеоцентр : Геодезиздат, 1999. 405 с.

3. Барлиани А.Г. Методы обработки и анализа пространственных и временных данных : монография. Новосибирск : СГУГиТ, 2016. 175 с.

4. Барлиани А.Г. Разработка алгоритмов уравнивания и оценки точности свободных и несвободных геодезических сетей на основе псевдонормального решения : монография. Новосибирск : СГГА, 2010. 134 с.

5. Барлиани А.Г. Метод Гревилля при уравнивании геодезических сетей // ГЕОСибирь-2008 : IV Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 5 т. (Новосибирск, 22–24 апреля 2008 г.). Новосибирск : СГГА, 2008. Т. 1. № 1. С. 271–273.

6. Волков В.И., Митягин С.Д., Волкова Т.Н. Новый подход к математической обработке результатов повторных геодезических наблюдений, используемых в архитектурно-строительной практике // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 6 (53). С. 216–221.

7. Загубалов А.В., Данченко О.В. Оценка погрешностей полигонометрических ходов методами математического моделирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 7 (66). С. 94–100.

8. Зайцев А.К. Трилатерация : монография. 2-е изд. М., 2018. 224 с.

9. Падве В.А. Потенциал универсального синтезированного алгоритма МНК оптимизации геодезических данных // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотоъемка. 2011. № 2. С. 34–42.

10. Телеганов Н.А. Уравнивание вновь присоединенных геодезических сетей // ГЕО-Сибирь. 2011. Т. 1. № 1. С. 181–186.

11. Bogomolova N., Nikitchin A. The excess measurements influence analysis in creating geodesic networks by the polygonometry method // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 698. Issue 4. P. 044011. DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044011

12. Mrówczyńska M., Sztubecki J., Greinert A. Compression of results of geodetic displacement measurements using the PCA method and neural net-

works // *Measurement*. 2020. Vol. 158. P. 107693. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107693

13. Kuchmister J., Gołuch P., Ćmielewski K., Rzepka J., Budzyń G. A functional-precision analysis of the Vertical Comparator for the Calibration of geodetic Levelling Systems // *Measurement*. 2020. Vol. 163. P. 107951. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107951

14. Šegina E., Peternel T., Urbančič T., Realini E., Zupan M., Jež J. et al. Monitoring surface displacement of a deep-seated landslide by a low-cost and near real-time GNSS system // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Issue 20. P. 3375. DOI: 10.3390/rs12203375

15. Bai X., Yan H., Zhu Y., Peng P., Yan Y., Shen Y. Formal error assessment of geodetic mean dynamic topography at different spatial scales // *Journal of Geodynamics*. 2020. Vol. 138. P. 101753. DOI: 10.1016/j.jog.2020.101753

16. Husson L., Bodin T., Spada G., Choblet G., Kreemer C. Bayesian surface reconstruction of geodetic uplift rates: Mapping the global fingerprint of Glacial Isostatic Adjustment // *Journal of Geodynamics*. 2018. Vol. 122. Pp. 25–40. DOI: 10.1016/j.jog.2018.10.002

17. Simonyan V.V. Methodology of comprehensive slope stability evaluation based on engineering geodesy and soil mechanics methods for the road engineering application // *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017*. 2018. Pp. 729–738. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1\_77

18. Simonjan V., Shendyapina S. Calculating the accuracy of strain observations of high-rise buildings and structures using electronic total stations // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 164. P. 02022 DOI: 10.1051/e3sconf/202016402022

19. Uzielli M., Nadim F., Lacasse S., Kaynia A.M. A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides // *Engineering Geology*. 2008. Vol. 102. Issue 2. Pp. 251–256. DOI: 10.1016/j.enggeo.2008.03.011

20. Volkov V.I. Program- and goal-oriented approach to organization of monitoring deformations of buildings and structures // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 725–726. Pp. 118–123. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.118

Поступила в редакцию 7 ноября 2021 г.

Принята в доработанном виде 31 января 2022 г.

Одобрена для публикации 31 января 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Викторович Симонян — кандидат технических наук, доцент, доцент Института гидротехнического и энергетического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 646817; simonyan.vladimir55@gmail.com;

Виктор Иванович Волков — доктор технических наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; РИНЦ ID: 66153; volkov@energaziz.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Astashenkov G.G., Barliani A.G., Kolmogorov V.G. Correlated version of accuracy assessment equalization of geodetic networks with equal observations by means of pseudooptimisation. *Vestnik SGUGiT*. 2016; 4(36):52-65. (rus.).
2. Batrakov Yu.G. *Geodetic networks for special purposes*. Moscow, Kartgeocentr, Geodezizdat Publ., 1999; 405. (rus.).
3. Barliani A.G. *Methods for processing and analyzing spatial and temporal data : monograph*. Novosibirsk, SGUGiT, 2016; 175. (rus.).
4. Barliani A.G. *Development of algorithms for adjusting and estimating the accuracy of free and non-free geodetic networks based on a pseudo-normal solution : monograph*. Novosibirsk, SSGA, 2010; 134. (rus.).
5. Barliani A.G. Greville method for adjustment of geodetic networks. *GEOSibir-2008: IV International Scientific Congress: collection of materials in 5 volumes (Novosibirsk, April 22–24, 2008)*. Novosibirsk, SSGA, 2008; 1(1):271-273. (rus.).
6. Volkov V.I., Mityagin S.D., Volkova T.N. A new approach to mathematical processing of the results of repeated geodetic observations used in architectural and construction practice. *Bulletin of Civil Engineers*. 2015; 6(53):216-221. (rus.).
7. Zagibalov A.V., Danchenko O.V. Polygon traverse error estimate by mathematical modeling methods. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2012; 7(66):94-100. (rus.).
8. Zaitsev A.K. *Trilateration : monograph. 2nd ed.* Moscow, 2018; 224. (rus.).
9. Padve V.A. Potential universal synthesized OLS algorithm optimization of geodetic data. *Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotography*. 2011; 2:34-42. (rus.).
10. Teleganov N.A. Adjustment of newly adjoined geodetic networks. *GEO-Sibir*. 2011; 1(1):181-186. (rus.).
11. Bogomolova N., Nikitchin A. The excess measurements influence analysis in creating geodesic networks by the polygonometry method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 698(4):044011. DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044011
12. Mrówczyńska M., Sztubecki J., Greinert A. Compression of results of geodetic displacement measurements using the PCA method and neural networks. *Measurement*. 2020; 158:107693. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107693
13. Kuchmister J., Gołuch P., Ćmielewski K., Rzepka J., Budzyń G. A functional-precision analysis of the Vertical Comparator for the Calibration of geodetic Levelling Systems. *Measurement*. 2020; 163:107951. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107951
14. Šegina E., Peternel T., Urbančič T., Realini E., Zupan M., Jež J. et al. Monitoring Surface Displacement of a Deep-Seated Landslide by a Low-Cost and near Real-Time GNSS System. *Remote Sensing*. 2020; 12(20):3375. DOI: 10.3390/rs12203375
15. Bai X., Yan H., Zhu Y., Peng P., Yan Y., Shen Y. Formal error assessment of geodetic mean dynamic topography at different spatial scales. *Journal of Geodynamics*. 2020; 138:101753. DOI: 10.1016/j.jog.2020.101753
16. Husson L., Bodin T., Spada G., Choblet G., Kreemer C. Bayesian surface reconstruction of geodetic uplift rates: Mapping the global fingerprint of Glacial Isostatic Adjustment. *Journal of Geodynamics*. 2018; 122:25-40. DOI: 10.1016/j.jog.2018.10.002
17. Simonyan V.V. Methodology of comprehensive slope stability evaluation based on engineering geodesy and soil mechanics methods for the road engineering application. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017*. 2018; 729-738. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1\_77
18. Simonjan V., Shendyapina S. Calculating the accuracy of strain observations of high-rise buildings and structures using electronic total stations. *E3S Web of Conferences*. 2020; 164:02022 DOI: 10.1051/e3sconf/202016402022
19. Uzielli M., Nadim F., Lacasse S., Kaynia A.M. A conceptual framework for quantitative estimation of physical vulnerability to landslides. *Engineering Geology*. 2008; 102(2):251-256. DOI: 10.1016/j.eng-geo.2008.03.011
20. Volkov V.I. Program- and goal-oriented approach to organization of monitoring deformations of buildings and structures. *Applied Mechanics and Materials*. 2015; 725-726:118-123. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.118

Received November 7, 2021.

Adopted in revised form on January 31, 2021.

Approved for publication on January 31, 2021.

**B I O N O T E S:** **Vladimir V. Simonyan** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Institute of Hydrotechnical and Energy Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoye shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 646817; simonyan.vladimir55@gmail.com;

**Victor I. Volkov** — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4 2nd Krasnoarmeiskaya, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RISC: 66153; volkov@energaziz.ru.

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

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

# ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 626-1/-2 : 551.466.44

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.83-92

## Преобразование параметров исходного волнения при искажении масштаба гидравлической модели

Юрий Александрович Шелушин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Сочинский государственный университет (СГУ); г. Сочи, Россия;

<sup>2</sup> Научно-исследовательский центр «Морские берега» — филиал Научно-исследовательского института транспортного строительства (НИЦ «Морские берега» — филиал НИИТС); г. Сочи, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В процессе разработки физических моделей гидротехнических сооружений часто применяется метод искажения масштаба. При этом научные исследования по самой методике искажений проводятся редко, особенно применительно к моделированию ветрового волнения. В современной практике искажение масштаба затрагивает только подводный рельеф и гидротехнические сооружения. Волнение остается без преобразования, что может приводить к погрешностям в режиме волн в контрольных точках на модели. С учетом данных о возникающих погрешностях рассмотрен вопрос преобразования параметров исходного волнения при искажении масштаба физической модели.

**Материалы и методы.** Применены физическое и численное моделирование. Экспериментальные исследования проводились в волновом лотке и волновом бассейне со стационарными продуктами. В ходе экспериментов осуществлялось измерение параметров волн в контрольных точках на искажаемых физических моделях при преобразовании режима исходного волнения. При помощи численного моделирования рассмотрены расчетные схемы, аналогичные физическим моделям.

**Результаты.** Получен комплекс данных по режиму волнения на физических моделях с разной степенью искажения в условиях трансформации и дифракции волн. Сопоставлены результаты физического и численного моделирования. Приведена оценка результатов, которых можно достигнуть при преобразовании параметров исходного волнения на искажаемых физических моделях.

**Выводы.** Искажение масштаба вносит изменения в режим волнения, которые могут не поддаваться простому контролю и корректировке, что необходимо учитывать в научной практике при разработке искаженных гидравлических моделей. Рассмотренный подход в разной мере эффективен для каждой конкретной физической модели с ее характерными процессами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** физическое моделирование, гидравлическая модель, искажение масштабов, трансформация волн, дифракция волн

*Благодарности.* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90009.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Шелушин Ю.А. Преобразование параметров исходного волнения при искажении масштаба гидравлической модели // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 1. С. 83–92. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.83-92

*Автор, ответственный за переписку:* Юрий Александрович Шелушин, 9117875@mail.ru.

## Changes in the initial parameters of waves caused by distortions in the scale of a hydraulic model

Yuriy A. Shelushinin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Sochi State University (SSU); Sochi, Russian Federation;

<sup>2</sup> Research Center “Sea Coast” — a branch of the Research Institute of Transport Construction; Sochi, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The distorted scale method is often used to develop physical models of hydraulic structures. Notably, scientific researches concerning the methodology of distortions are quite rare, especially those that are focused on the modeling of wind waves. In the modern practice, scale distortions only affect the underwater topography and hydraulic structures. In this case, initial waves remain unchanged, and this can lead to errors in the wave mode at the control points of a model. Given the data on errors, the author considers the changes in the parameters of initial waves, if the scale of a physical model is distorted.

**Materials and methods.** The author used methods of physical and numerical modeling. Experimental studies were conducted in a wave flume and a wave pool that had a wavemaker. In the course of the experiments, the initial wave mode was changed and the parameters of waves were measured at the control points of distorted physical models. Numerical modeling was employed to analyze the computational patterns similar to the physical models.

**Results.** The author used physical models featuring varying degrees of distortion to obtain a collection of the wave mode data under the conditions of the wave transformation and diffraction. Physical and numerical modeling results are compared. The author provides an assessment of the results attained by changing the parameters of initial waves and distorted physical models.

**Conclusions.** The scale distortion triggers changes in the wave mode that may not be easy to control and correct. This fact must be taken into account when distorted hydraulic models are developed. This approach demonstrates varying efficiency if applied to different physical models featuring characteristic processes.

**KEYWORDS:** physical modeling, hydraulic model, scale distortion, wave transformation, wave diffraction

*Acknowledgements.* The reported study was funded by RFBR, project No. 20-38-90009.

**FOR CITATION:** Shelushinin Yu.A. Changes in the initial parameters of waves caused by distortions in the scale of a hydraulic model. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(1):83-92. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.83-92 (rus.).

*Corresponding author:* Yuriy A. Shelushinin, 9117875@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

В мировой практике при физическом моделировании ветрового волнения всегда используется приближенное динамическое подобие в той или иной степени [1–6], ведь для обеспечения строгого динамического подобия потребовалось бы создавать модель с натурными габаритами. Одновременное выполнение всех условий подобия дает гарантию точного подобия процессов и считается, бесспорно, достаточным, но не всегда необходимым, чтобы опыт имел должное познавательное значение. Для уменьшения физической модели приходится пренебрегать наименее значимыми условиями и вырождающимися критериями подобия, принимать допущения и степень приближения, при которой достоверность получаемых данных будет достаточной.

Гидравлические модели с искаженным масштабом [7–9] применяются в качестве особого вида приближения, к которому прибегают из-за необходимости уменьшения модели. Чтобы такое приближение отвечало целям исследования, требуется обеспечить и обосновать соответствие модельных процессов натурным. Приближение будет лишено практического смысла, если на изучаемые сооружения начинает воздействовать новый режим волнения, не имеющий обоснованного соответствия натурным процессам.

Тема искажения масштабов физической модели актуальна в настоящее время, поскольку в проектной практике данный метод применяется довольно часто [10–17], а научных исследований по самой методике искажений очень мало, особенно применительно к моделированию волнения.

Среди причин, по которым в исследовательских работах прибегают к искажению пропорций физических моделей, можно выделить две основные — это ограниченность размеров лабораторных установок и невозможность бесконечного уменьшения модели при изучении процессов волнения. Помимо этого, строительство и эксплуатация крупноразмерных физических моделей связана с существенными финансовыми и временными затратами, что критично в условиях современной производственной прак-

тики. Реже причиной искажения масштаба могут служить иные объективные обстоятельства, как, например, необходимость компенсации уклонов профиля динамического равновесия при использовании натурального песка на модели [18].

Данные о проведенных экспериментальных исследованиях с искажением масштаба можно найти как в России, так и за рубежом [10–17]. К примеру, при лабораторных исследованиях волнения в порту Апра (о. Гуам, США) только путем искажения масштаба удалось компенсировать нежелательное появление ламинарного режима движения жидкости [19]. При моделировании волнения в порту Литтон (Англия) было решено применить искаженный масштаб, чтобы затухание волн на пути от волнопродуктора до ворот не превышало 15 %.

В мире до сих пор востребованы крупногабаритные лабораторные установки, что само по себе говорит о недостаточном научном обосновании и неготовности метода искажения масштабов для широкого применения. В качестве примера можно отметить современный волновой канал в Ганновере длиной 310 м. Ширина канала составляет 5 м, а высота щита волнопродуктора 7 м. Подобные габариты экспериментальной установки позволяют моделировать гидравлические процессы практически в натурном масштабе.

Одним из способов искажения масштаба является сжатие плановых (горизонтальных) габаритов акватории относительно ее вертикальных размеров [18]. При этом параметры волн на модели задаются в соответствии с неискаженным вертикальным масштабом.

В современной практике при моделировании волнения искажение масштаба затрагивает только рельеф и гидротехнические сооружения [10, 11, 18]. В модельной акватории с измененным рельефом воспроизводится исходное волнение без преобразования. Волнение по-разному взаимодействует с разными формами рельефа, и поскольку искажение масштаба затрагивает подводный рельеф, то требуется рассмотреть и вопрос преобразования исходного волнения. Результаты численного моделирования [10, 11] также подталкивают к вопросу преобразования параметров исходного волнения.

Для степени искажения масштаба, как для задаваемого параметра модели, не существует выраженной автомодельной области подобия процессов волнения. При искажении масштаба физической модели, для которой характерны процессы рефракции и трансформации волн, возникающие погрешности в режиме волнения в основном обусловлены изменением двух параметров: уклона подводного рельефа и угла подхода волн к подводному склону. При наличии выраженных процессов дифракции (огражденные акватории) появляются два дополнительных параметра, изменение которых во многом определяет возникающие погрешности при искажении масштаба — это ширина входного створа и расстояние от него до расчетных точек. Изменение вышеописанных параметров в результате искажения пропорций модели ожидаемо сказывается на режиме волнения, исходные параметры которого искажение масштаба не затрагивает.

Определенная степень искажения масштаба в каждом случае оказывает уникальное влияние на получаемые при моделировании результаты [10, 11]. Эффект от искажения геометрических пропорций обусловлен конкретной формой рельефа, осью и степенью искажения, параметрами волнения и выбранными расчетными точками. К примеру, погрешности в режиме волнения, возникающие при искажении простого и сложного рельефа, существенно различаются. Из этого следует, что любые математические зависимости для пересчета данных искаженного моделирования должны содержать параметр, учитывающий особенности искажаемого рельефа. Для достоверного установления подобного параметра требуется проводить отдельные сопровождающие экспериментальные исследования для каждого конкретного расчетного случая. При этом в любой научной работе нерационально увеличивается объем экспериментальных исследований, ведь каждый раз необходимо осуществлять одни физические опыты ради повышения достоверности других.

В качестве альтернативы рассмотрен способ, при котором параметры исходного волнения на физической модели подвергаются преобразованию с учетом данных численного моделирования о возникающих погрешностях. Например, при сжатии плановых размеров физической модели относительно неизменного вертикального масштаба параметры волнения в разных расчетных точках в различной степени увеличиваются в результате сокращения горизонтальных расстояний и увеличения уклонов подводного рельефа. В таком случае, согласно рассмотренному способу, параметры исходного волнения подвергаются уменьшению методом последовательных приближений.

Преобразование параметров исходных волн должно быть нацелено на достижение следующих результатов:

- уравнивание величины погрешностей для разных расчетных точек;
- упрощение изменений в режиме волнения, возникающих при искажении масштаба;
- более точное соответствие натурным условиям получаемых на модели данных и повышение точности прогнозирования;
- повышение обоснованности принимаемых степеней искажения масштаба.

При преобразовании параметров волнения следует придерживаться нескольких основных правил, это сохранение:

- пологости волн;
- соответствия планов рефракции и дифракционных картин;
- соответствия модельного и натурального режимов волнения по основным параметрам (при возможности).

Сохранение пологости волн [4–6] при моделировании является очевидной необходимостью, поскольку отражает характер воздействия волн на исследуемые сооружения и соответствие общей волновой обстановки натурным условиям. Физическая модель не будет иметь познавательной ценности, если волна, к примеру, в опытах начнет обрушаться в глубоководной зоне, либо превратится в длиннопериодное изменение уровня моря. В качестве характерного параметра, определяющего пологость, стоит использовать классическое соотношение высоты и длины волны ( $h/\lambda$ ) [2, 5, 20]. Следовательно, для исходного и преобразованного режима волнения должно обеспечиваться равенство:

$$\frac{h_{\text{исх}}}{\lambda_{\text{исх}}} = \frac{h_{\text{пр}}}{\lambda_{\text{пр}}},$$

где  $h_{\text{исх}}$  и  $\lambda_{\text{исх}}$  — соответственно высота и длина исходной волны;  $h_{\text{пр}}$  и  $\lambda_{\text{пр}}$  — высота и длина преобразованной волны в модельном масштабе.

Совпадение планов рефракции и дифракционных картин на модели и в натуре упрощает интерпретацию получаемых на модели данных. Оценка общего характера рефракции или дифракции волн может осуществляться, к примеру, путем численного моделирования, в ходе которого проводится трассировка волновых лучей по нормативной методике расчета [20], представленной в СП 38.13330.

Преобразование параметров исходных волн в общем случае требуется нацелить на сохранение схемы рефракции и дифракции, чтобы модельная волновая обстановка соответствовала натуре. В результате искажения масштаба на исследуемом участке не должны появляться новые формы рельефа. Например, неприемлемо исчезновение существующих подводных каньонов, как и появление новых.

Также в результате искажения масштаба следует избегать изменения дифракционной карти-

ны. Если в натуральных условиях волны обрушаются на обширных отмелях, ограждающих исследуемую акваторию, то при искажении масштаба недопустимо возникновение ситуации, при которой волны на модели начнут беспрепятственно без обрушений проникать в акваторию.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вопрос преобразования параметров исходного волнения рассмотрен при помощи физического и численного моделирования [2, 5, 6, 20].

Экспериментальные исследования проводились на базе Обособленного подразделения АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега» с использованием волнового лотка и волнового бассейна со стационарными волнопродукторами. Эта экспериментальная база дает возможность моделировать процессы взаимодействия волн с подводным рельефом и ограждающими сооружениями (рис. 1), а также проводить измерения элементов волн. Измерения осуществляются специально разработанными емкостными волнографами ДУЕ-1 с цифровой записью данных, а также с помощью видео- и фотокамер.

Волнографы ДУЕ-1 позволяют выполнять цифровую запись положения уровня воды с частотой 34 Гц в течение заданного промежутка времени. При установке двух и более волнографов на извест-

ном расстоянии друг от друга по линии распространения волнения, помимо высоты и периода волн по смещению фаз, на цифровой записи можно измерять скорость движения гребня и длину волны (рис. 2).

Физическое моделирование трансформации волн на искажаемом рельефе производилось в волновом лотке в масштабе 1:35. При искажении масштаба меняется уклон подводного рельефа, что приводит к погрешностям в режиме волнения. Основная задача серии опытов в волновом лотке заключалась в том, чтобы на упрощенной модели экспериментально установить, как меняется режим волнения при изменении уклона в расчетных точках и каких результатов можно достигнуть при преобразовании параметров исходного волнения по информации о возникающих погрешностях [10].

Для физической модели подводного рельефа со средним уклоном  $i = 0,018$  по линии прохождения волн сжатие вдоль берегового или плановых размеров в 2 раза приводит к изменению уклона в расчетных точках в диапазоне  $i = 0,018...0,036$ . Для решения поставленной задачи были проведены опыты (рис. 3, 4) с четырьмя различными уклонами подводного рельефа и с диапазоном высот исходных волн от 9,4 до 11,4 см. Параметры волн измерялись в двух контрольных точках на глубине 28,6 и 21,4 см.



Рис. 1. Волновой лоток (а) и волновой бассейн (б) на базе АО ЦНИИТС «НИЦ «Морские берега»

Fig. 1. Wave flume (a) and wave pool (b) at the Seashore Research centre of the JSC Central Research Institute of Construction of Transport Facilities

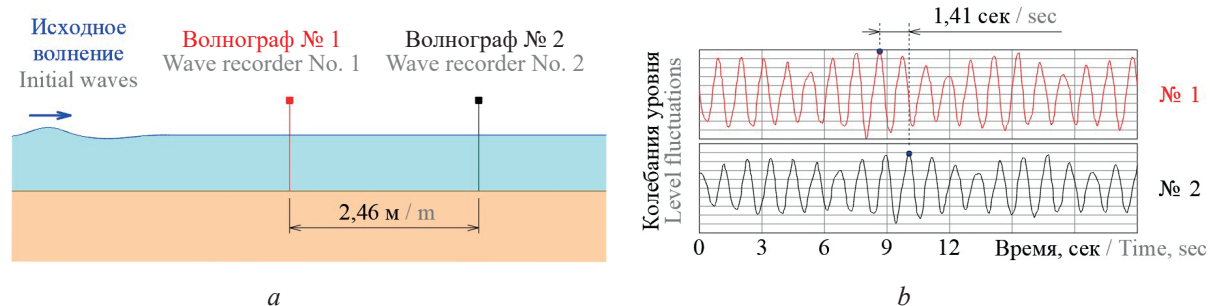


Рис. 2. Схема измерительной системы из волнографов ДУЕ-1 (а) и пример записи волновых колебаний уровня (б)

Fig. 2. The diagram of the measurement system made of wave recorders DUE-1 (a) and a sample recording of level fluctuations (b)

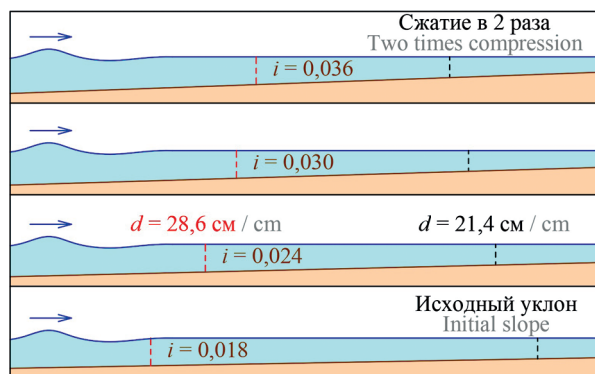


Рис. 3. Схема физических моделей в волновом лотке:  $i$  — уклон подводного рельефа;  $d$  — глубина в контрольной точке

Fig. 3. The diagram of physical models in the wave flume:  $i$  — the underwater slope;  $d$  — the depth at the control point

Процесс дифракции волн в искажаемом входном створе оградительных сооружений рассматривался как пространственная задача в волновом бассейне в масштабе 1:65 на физической модели, разработанной сотрудниками НИУ МГСУ и АО ЦНИИТС. Искажение масштаба затрагивает ширину входного створа и расстояния до расчетных точек, что приводит к погрешностям в режиме волнения. Основная задача серии опытов в бассейне состояла в том, чтобы на упрощенной дифракционной схеме экспериментально определить, как меняется режим волнения при сжатии плановых размеров огражденной акватории и каких результатов можно достигнуть при преобразовании параметров исходного волнения по данным о возникающих погрешностях [11].

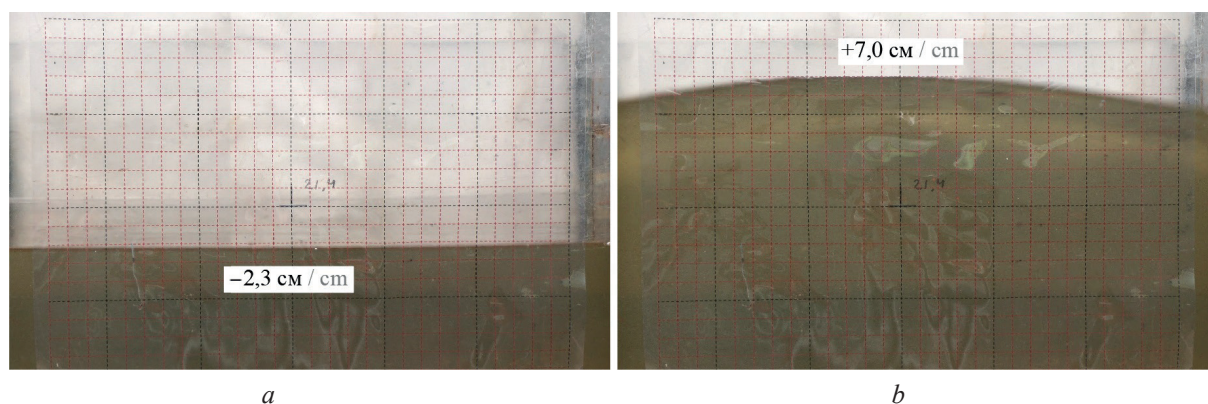


Рис. 4. Волнение в контрольной точке на глубине  $d = 21,4$  см при исходной высоте волны  $h = 11,4$  см для уклона  $i = 0,018$ :  $a$  — ложбина;  $b$  — гребень волны

Fig. 4. Waves at the control point at a depth of  $d = 21.4$  cm at the initial wave height  $h = 11.4$  cm for the slope  $i = 0.018$ :  $a$  — wave trough;  $b$  — wave crest

Для физической модели огражденной акватории с шириной входного створа 4,62 м сжатие плановых размеров в 1,25 раза приводит к сокращению ширины створа до 3,69 м. С целью решения поставленной задачи выполнены опыты на упрощенном входном створе (рис. 5) с диапазоном высот исходных волн от 5,0 до 6,5 см. Параметры волн измерялись в шести контрольных точках.

Наполнение бассейна было достаточным, чтобы исключить процесс трансформации волн и сфокусировать внимание на дифракционной картине. Отражение волн от стенок бассейна и ограждающих сооружений регулировалось при помощи передвижных волногасителей и волногасящей наброски из тетраподов и гексабитов. Физические опыты проводились в соответствии с современной теорией подобия [2, 5, 6].

В ходе численного моделирования рассматривались расчетные схемы, аналогичные физическим моделям в условиях искажения масштаба и преобразования параметров исходного волнения. Расчет параметров волнения при трансформации и диф-

ракции производился по нормативной методике РФ [20], представленной в СП 38.13330.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данные, полученные по результатам физического и численного моделирования, сопоставлены в табл. 1, 2 и на рис. 6.

Результаты расчета по нормативной методике СП 38.13330 удовлетворительно соответствуют данным экспериментов. В волновом лотке (рис. 1, 3) наглядно проявляются изменения в режиме волнения при подборе уклона рельефа и высоты исходных волн.

Согласно принципу Гюйгенса – Френеля [20] при расчете дифракции головные участки оградительных сооружений рассматриваются в качестве источников кольцевых волн, и это обстоятельство хорошо проявляется в волновом бассейне (рис. 5,  $b$ ). Распространение кольцевых фронтов в зоне волновой тени видно невооруженным глазом даже без применения измерительных инструментов.

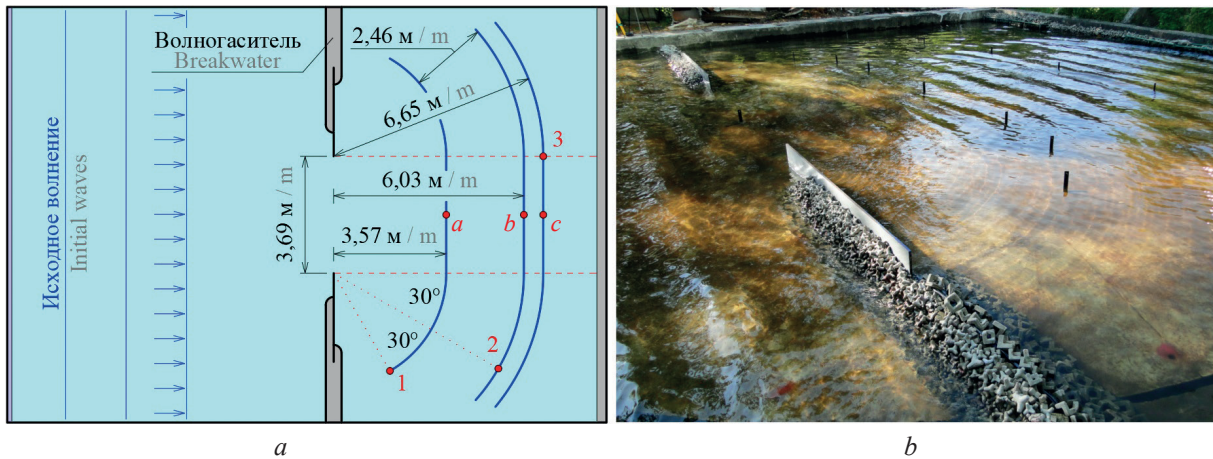


Рис. 5. Схема искаженной физической модели в волновом бассейне (а) и общий вид дифракции волн в опытах (б)

Fig. 5. The diagram of a distorted physical model in a wave pool (a) and the general view of the wave diffraction in the course of experiments (b)

Табл. 1. Сопоставление данных физического и численного моделирования трансформации волн на искажаемом рельефе

Table 1. Data comparison on physical and numerical modeling of wave transformation on distorted relief

Степень сжатия плановых размеров Compression ratio of horizontal dimensions	Исходные параметры волнения, см Initial wave parameters, cm	Уклон подводного рельефа Underwater slope	Высота волны на глубине 28,6 см Wave height (cm) at the depth of 28.6 cm	Высота волны на глубине 21,4 см Wave height (cm) at the depth of 21.4 cm	Глубина первого обрушения, см Depth of the first breaking, m
Данные физического моделирования / Data on physical modeling					
Без искажения No compression	Без преобразования No changes ( $h = 11,4; \lambda = 357, 1$ )	0,018	9,0	9,3	20,2
1,33	$h = 11,4; \lambda = 357, 1$	0,024	9,7	10,1	20,9
	$h = 10,9; \lambda = 341,4$		9,3	9,6	19,0
	$h = 10,7; \lambda = 334,4$		9,0	9,2	18,2
	$h = 10,4; \lambda = 325,8$		8,8	9,1	16,9
	$h = 9,9; \lambda = 310,1$		8,4	8,7	16,5
1,67	$h = 11,4; \lambda = 357, 1$	0,030	10,7	Обрушение Breaking	23,5
	$h = 10,9; \lambda = 341,4$		10,3		21,0
	$h = 10,4; \lambda = 325,8$		9,6	10,2	19,4
	$h = 9,9; \lambda = 310,1$		9,3	9,7	17,5
	$h = 9,7; \lambda = 303,1$		8,9	9,3	17,0
	$h = 9,4; \lambda = 294,5$		8,7	9,2	16,8
2,0	$h = 11,4; \lambda = 357, 1$	0,036	10,8	Обрушение Breaking	23,0
	$h = 10,9; \lambda = 341,4$		10,2		20,4
	$h = 10,4; \lambda = 325,8$		9,6	10,3	19,1
	$h = 9,9; \lambda = 310,1$		9,3	9,6	17,5
	$h = 9,7; \lambda = 303,1$		9,0	9,4	16,9
	$h = 9,4; \lambda = 294,5$		8,6	9,2	16,8

Окончание Табл. 1 / End of the Table 1

Степень сжатия плановых размеров Compression ratio of horizontal dimensions	Исходные параметры волнения, см Initial wave parameters, cm	Уклон подводного рельефа Underwater slope	Высота волны на глубине 28,6 см Wave height (cm) at the depth of 28.6 cm	Высота волны на глубине 21,4 см Wave height (cm) at the depth of 21.4 cm	Глубина первого обрушения, см Depth of the first breaking, m
Данные численного моделирования, приведенные к масштабу физических опытов Data on numerical modeling in the scale of the physical experiments					
Без искажения No compression	Без преобразования No changes ( $h = 11,4; \lambda = 357, 1$ )	0,018	9,2	9,2	21,4
1,33	$h = 11,4; \lambda = 357, 1$	0,024	9,9	10,0	21,8
	$h = 10,7; \lambda = 334,4$		9,2	9,3	19,1
1,67	$h = 11,4; \lambda = 357, 1$	0,030	10,9	Обрушение Breaking	24,7
	$h = 9,7; \lambda = 303,1$		9,1	9,4	17,3
2,0	$h = 11,4; \lambda = 357, 1$	0,036	10,9	Обрушение Breaking	24,3
	$h = 9,7; \lambda = 303,1$		9,1	9,4	17,0

Табл. 2. Сопоставление данных физического и численного моделирования дифракции волн в искажаемом входном створе

Table 2. Compared data on the physical and numerical modeling of the wave diffraction in the distorted entrance gate

Степень сжатия плановых размеров Compression ratio of horizontal dimensions	Исходные параметры волнения, см Initial wave parameters, cm	Ширина входного створа, м Entrance gate width, m	Высота волн в контрольной точке, см Wave height at the control point, cm					
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	3	2	1
Данные физического моделирования / Data on physical modeling								
Без искажения No compression	Без преобразования No changes ( $h = 6,2; \lambda = 192,3$ )	4,62	6,0	5,3	5,2	3,9	2,1	1,4
1,25	$h = 6,2; \lambda = 192,3$	3,69	5,8	5,2	5,1	4,0	2,2	1,6
	$h = 6,5; \lambda = 202,5$		6,1	5,5	5,3	4,2	2,3	1,9
	$h = 5,8; \lambda = 180,8$		5,5	5,0	4,8	3,8	2,1	1,5
	$h = 5,0; \lambda = 153,8$		4,7	4,3	4,2	3,2	1,8	1,2
Данные численного моделирования, приведенные к масштабу физических опытов Data on numerical modeling in the scale of physical experiments								
Без искажения No compression	Без преобразования No changes ( $h = 6,2; \lambda = 192,3$ )	4,62	5,8	5,3	5,2	3,9	1,9	1,3
1,25	$h = 6,2; \lambda = 192,3$	3,69	5,7	5,1	5,0	3,9	2,0	1,4
	$h = 6,5; \lambda = 202,5$		6,0	5,4	5,2	4,1	2,1	1,6
	$h = 5,8; \lambda = 180,8$		5,4	4,9	4,7	3,6	1,9	1,3
	$h = 5,0; \lambda = 153,8$		4,6	4,2	4,1	3,1	1,6	1,0

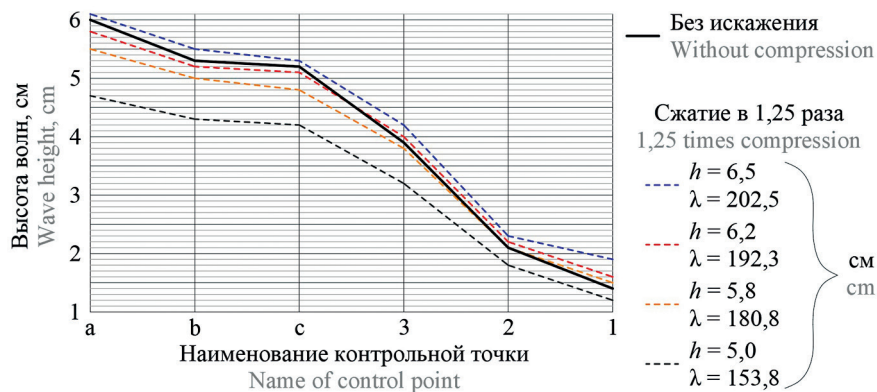


Рис. 6. Режим волнения в контрольных точках на физической модели при искажении масштаба и преобразовании параметров исходного волнения:  $h$  — высота исходных волн;  $\lambda$  — длина исходных волн

Fig. 6. The wave mode at the control points of a physical model subjected to the scale distortion and changes in initial wave parameters:  $h$  — initial wave height;  $\lambda$  — length of initial waves

Основная сложность воссоздания идеальных дифракционных процессов в экспериментах заключается в наличии многократных отражений волн от стенок волнового бассейна. Дифракционные схемы очень чувствительны к отражению волн от внутренних граней огражденной акватории, поэтому требуется уделять должное внимание повышению волногасящей способности всех отражающих поверхностей. Взаимодействие разнонаправленных волн с большим количеством незащищенных отражающих поверхностей приводит к образованию стоячих волн и разбиению волнения на разнообразные сонаправленные фазы, в результате чего средняя длина волн в огражденной акватории может становиться значительно меньше длины волн в исходном шторме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

Преобразование параметров исходного волнения при физическом моделировании трансформации волн с искажением масштаба в полной мере не решает проблему возникающих погрешностей. Такой подход позволяет уменьшить погрешности в значениях высот волн в контрольных точках и даже добиться полного их соответствия, но при этом увеличивается смещение линии обрушений, что может быть критично в рамках решаемых на практике научных задач. Изменение уклона подводного рельефа в результате искажения масштаба существенно сказывается на режиме волнения, и компенсировать этот эффект нужным образом в экспериментах может быть достаточно трудно или невозможно.

Процесс дифракции более чувствителен к степени искажения масштаба, чем процесс трансформации. Преобразование параметров исходного волнения в данном случае не имеет существенно полезного эффекта.

Погрешности, возникающие при искажении масштаба дифракционной схемы, разнонаправлены, т.е. при сжатии плановых размеров огражденной акватории высота волн в створе свободного просвета может уменьшаться, а в зоне волновой тени увеличиваться. В таких условиях увеличение параметров исходных волн еще больше усложняет дифракционную картину, так как в результате увеличивается степень искажения плановых размеров по отношению к вертикальной высоте волны.

Уменьшение параметров исходных волн в свою очередь ведет к классическому геометрическому подобию, когда параметры волн будут уменьшены в той же степени, в которой уменьшены и плановые размеры относительно вертикального масштаба. Таким образом, если модель слишком велика для волнового бассейна, то все сводится к уменьшению модели целиком по всем координатным осям.

По данным экспериментальных исследований видно, что искажение масштаба вносит изменения в режим волнения, которые могут не поддаваться простому контролю и корректировке. Интерпретация получаемых на модели данных усложняется различием погрешностей для разных расчетных точек. Эти обстоятельства необходимо учитывать в научной практике при разработке искаженных гидравлических моделей.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рогачко С.И., Шунько Н.В. Научное сопровождение проектирования берегозащитных сооруже-

ний // Вестник МГСУ. 2016. № 12. С. 103–113. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.103-113

2. Frostick L.E., McLelland S.J., Mercer T.G. Users guide to physical modelling and experimentation. London : Taylor & Francis Group, 2011. DOI: 10.1201/b11335

3. Пиляев С.И., Губина Н.А. Воздействие морских волн на подводные рыболовные садки // Вестник МГСУ. 2014. № 2. С. 171–178. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.2.171-178

4. Макаров К.Н. Морские гидротехнические сооружения : учебное пособие. Сочи : СГУ, 2018. 269 с.

5. Шарп Д.Д. Гидравлическое моделирование / пер. с англ. М. : Мир, 1984. 280 с.

6. Михалев М.А. Физическое моделирование гидравлических явлений. СПб. : Изд-во Политехн. университета, 2010. 443 с.

7. Маневич Я.З. О гидравлическом моделировании с искажением масштабов моделей // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1977. Т. 115. С. 67–72.

8. Назарян А.Г. Об искажении масштабов при моделировании // Гидротехническое строительство. 1963. № 6. С. 44.

9. Офицеров А.С. Искаженные модели и результаты волновых исследований на них // Труды гидравлической лаборатории № 6 ВНИИ Водгео. М. : Госстройиздат, 1956. 187 с.

10. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. № 2 (32). С. 4. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

11. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Подобие режима волнения в натуре при искажении масштабов гидравлической модели // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2020. № 5–6 (256–257). С. 29–35.

12. Кантаржи И.Г., Акулинин А.Н. Физическое моделирование воздействия волн цунами на бере-

говые сооружения // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10. № 3. С. 78–90. DOI: 10.7868/S2073667317030078

13. Кантаржи И.Г., Мордвицев К.П. Численное и физическое моделирование в МГСУ морских портовых гидротехнических сооружений // Наука и Безопасность. 2015. № 2 (15). С. 2–16.

14. Li X., Ercicun S., Bruwier M., Mignot E., Finaud-Guyot P., Archambeau P. et al. Laboratory modelling of urban flooding: Strengths and challenges of distorted scale models // Hydrology and Earth System Sciences. 2019. Vol. 23. Issue 3. Pp. 1567–1580. DOI: 10.5194/hess-2018-484

15. Güneş M.S., Tayfur G., Bombar G., Elci S. Distorted physical model to study sudden partial dam break flows in an urban area // Journal of Hydraulic Engineering. 2014. Vol. 140. Issue 11. P. 05014006. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000926

16. Zheng Z., Ma X., Wu H., Dong Y., Dong G. The effect of distorted scale ratio on harbor resonance with constant water depth // APAC 2019. 2020. Pp. 1263–1270. DOI: 10.1007/978-981-15-0291-0\_172

17. Fang H., He G., Liu J., Chen M. 3D Numerical investigation of distorted scale in hydraulic physical model experiments // Journal of Coastal Research. 2008. Pp. 41–54. DOI: 10.2112/1551-5036-52.sp1.41

18. Масс Е.И., Мальцев В.П., Шахин В.М. Рекомендации по гидравлическому моделированию волнения и его воздействий на песчаные побережья морей и водохранилищ. М. : ЦНИИС, 1987. 96 с.

19. Вайсфельд И.А. Выбор масштаба и масштабные поправки при моделировании акваторий портов // Волновые исследования гидротехнических сооружений. М. : ВНИИ Водгео, 1961. С. 135–162.

20. Ланно Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Л. : ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1990. 427 с.

Поступила в редакцию 28 октября 2021 г.

Принята в доработанном виде 8 ноября 2021 г.

Одобрена для публикации 29 декабря 2021 г.

ОБ АВТОРЕ: Юрий Александрович Шелушин — аспирант кафедры строительства; Сочинский государственный университет (СГУ); старший инженер лаборатории защиты берегов; 354000 г. Сочи, ул. Пластунская, д. 94; Научно-исследовательский центр «Морские берега» — филиал Научно-исследовательского института транспортного строительства (НИЦ «Морские берега» — филиал НИИТС); 354002, г. Сочи, ул. Яна Фабрициуса, д. 1; РИНЦ ID: 1125766, ORCID: 0000-0003-2007-5117; 9117875@mail.ru, 8-988-150-21-66

## REFERENCES

1. Rogachko S.I., Shun'ko N.V. Scientific monitoring of bank protection structures designing. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016; 12:103-113. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.103-113 (rus).

2. Frostick L.E., McLelland S.J., Mercer T.G. *Users Guide to Physical Modelling and Experimentation*.

London, Taylor & Francis Group, 2011. DOI: 10.1201/b11335.

3. Pilyaev S.I., Gubina N.A. Impact of sea waves on underwater fish-breeding cages. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014; 2:171-178. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.2.171-178 (rus.).

4. Makarov K.N. *Marine hydrotechnical structures*. Sochi, SSU, 2018; 269. (rus.).
5. Sharp J.J. *Hydraulic modelling*. Moscow, Mir, 1984; 280. (rus.).
6. Mihalev M.A. *Physical modelling of hydraulic processes*. St. Petersburg, Politechnic University Publ., 2010; 443. (rus.).
7. Manevich Ya.Z. About hydraulic modelling with a distorted scale of model. *Izvestia VNIIG named after B.E. Vedeneev*. 1977; 115:67–72. (rus.).
8. Nazaryan A.G. About scale distortion in modeling. *Hydraulic Engineering*. 1963; 6:44. (rus.).
9. Oficerov A.S. *Distorted models and results of wave exploring on them*. Moscow, VNII Vodgeo Publ., 1956; 187. (rus.).
10. Shelushinin Y.A., Makarov K.N. Problems and prospects for hydraulic modeling of wave processes in the distorted scales. *Construction: Science and Education*. 2019; 9(2):(32):4. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4 (rus.).
11. Shelushinin Yu.A., Makarov K.N. Similarity of the mode with the distortion of the scale of the hydraulic model. *Building materials, equipment, technologies of XXI century*. 2020; 5-6(256-257):29-35. (rus.).
12. Kantardgi I.G., Akulinin A.N. Physical modeling of tsunami waves impact on shore structures. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2017; 10(3):78-90. DOI: 10.7868/S2073667317030078 (rus.).
13. Kantardgi I.G. Mordvincev K.P. Numerical and physical modeling of the sea port structures in Moscow State University of Civil Engineering. *Science and Safety*. 2015; 2(15):2-16. (rus.).
14. Li X., Erpicum S., Bruwier M., Mignot E., Finaud-Guyot P., Archambeau P. et al. Laboratory modelling of urban flooding: Strengths and challenges of distorted scale models. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2019; 23(3):1567-1580. DOI: 10.5194/hess-2018-484
15. Güney M.S., Tayfur G., Bombar G., Elci S. Distorted physical model to study sudden partial dam break flows in an urban area. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2014; 140(11):05014006. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000926
16. Zheng Z., Ma X., Wu H., Dong Y., Dong G. The effect of distorted scale ratio on harbor resonance with constant water depth. *APAC 2019*. 2020; 1263-1270. DOI: 10.1007/978-981-15-0291-0\_172
17. Fang H., He G., Liu J., Chen M. 3D Numerical investigation of distorted scale in hydraulic physical model experiments. *Journal of Coastal Research*. 2008; 41-54. DOI: 10.2112/1551-5036-52.sp1.41
18. Mass E.I., Malcev V.P., Shahin V.M. *Recommendations for hydraulic modelling of waves and their impact on sandy coast of seas and reservoir*. Moscow, TsNIIS, 1987; 96. (rus.).
19. Vaisfeld I.A. *Scale selection and scale corrections in modeling of port areas*. Moscow, VNII Vodgeo Publ., 1961; 135-162. (rus.).
20. Lappo D.D., Strekalov S.S., Zav'yalov V.K. *Loads and Impacts of Wind Waves on Hydraulic Structures*. St. Petersburg, VNIIG Publ., 1990; 427. (rus.).

Received October 28, 2021.

Adopted in revised form on November 8, 2021.

Approved for publication on December 29, 2021.

**BIONOTES:** Yuriy A. Shelushinin — postgraduate student of the Department of construction; Sochi State University (SSU); 94 Plastunskaya st., Sochi, 354000, Russian Federation; senior engineer; **Research Center “Sea Coast” — a branch of the Research Institute of Transport Construction**; 1 Yana Fabricius st., Sochi, 354002, Russian Federation; ID RISC: 1125766, ORCID: 0000-0003-2007-5117; 9117875@mail.ru.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 502.7 : 624.131.3 : 556.3 : 626

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.93-105

## Обоснование выбора оптимального основания противодиффузионного контура при рекультивации накопителей токсичных отходов

Станислав Викторович Сольский, Олег Николаевич Котлов,  
Федор Петрович Собкалов

*Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева (ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева); г. Санкт-Петербург, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Накопители высокотоксичных отходов производств, расположенных на территории бывшего Средне-Волжского завода химикатов (СВЗХ) в г. Чапаевск Самарской области, являются источником негативного воздействия на окружающую среду. Ситуация усугубляется отсутствием надежного контура противодиффузионной защиты накопителей, замкнутого на естественные водоупорные слои. Цель исследования — обоснование выбора оптимального основания противодиффузионных завес (ПФЗ), выполняемых способом «стена в грунте» по периметру накопителей высокотоксичных отходов, путем уточнения фильтрационных характеристик водоупорных грунтов с помощью интерпретации специальных опытно-фильтрационных работ (ОФР), и последующая проверка эффективности технических решений на разработанной геофильтрационной модели.

**Материалы и методы.** Processing Modflow — программное обеспечение (ПО), предназначенное для трехмерного моделирования фильтрации и переноса загрязняющих веществ. Исходными данными для построения геофильтрационной модели послужили технические отчеты по инженерным изысканиям, выполненным в 2013 г. на территории СВЗХ; результаты интерпретации в программе ANSDIMAT специальных ОФР и натурные наблюдения за уровнем режимом площадки СВЗХ.

**Результаты.** В результате интерпретации проведенных специальных ОФР графоаналитическим методом в программе ANSDIMAT и их имитации на численной модели в Processing Modflow уточнены фильтрационные характеристики глинистых пород верхнечетвертичных отложений. Полученные характеристики подтвердили возможность использования этого инженерно-геологического элемента в качестве основания проектируемых ПФЗ. С применением ПО Processing Modflow подтверждена высокая эффективность противодиффузионного защитного контура, позволившего существенно снизить приточность в накопители в период их рекультивации.

**Выводы.** При рекультивации территории бывшего СВЗХ рекомендуемым к реализации является вариант с устройством ПФЗ по периметру накопителей с замыканием контура на глинистые породы верхнечетвертичных отложений. Предложенное техническое решение даст возможность сконцентрировать высокотоксичный фильтрат внутри накопителей и будет препятствовать его распространению в окружающей среде.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** противодиффузионные завесы, способ «стена в грунте», основание завесы, накопители токсичных отходов, фильтрат, подземные воды, поверхностные воды, моделирование, рекультивация

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Сольский С.В., Котлов О.Н., Собкалов Ф.П. Обоснование выбора оптимального основания противодиффузионного контура при рекультивации накопителей токсичных отходов // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 1. С. 93–105. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.93-105

Автор, ответственный за переписку: Федор Петрович Собкалов, sobkalofp@vniig.ru.

## Justification of the optimal base choice for the anti-filtration circuit during the reclamation of toxic waste storage facilities

Stanislav V. Solsky, Oleg N. Kotlov, Fedor P. Sobkalov

*All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneev (VNIIG named after B.E. Vedeneev); Saint Petersburg, Russian Federation*

### ABSTRACT

**Introduction.** Storage facilities, designated for the toxic production waste and located on the premises of the former Sredne-Volzhsky chemical plant in Chapayevsk, Samara Region, are sources of negative environmental impacts. The situation is aggravated by the lack of a reliable seepage prevention circuit at toxic waste storage facilities, enclosed by natural impermeable layers. The purpose of the study is to substantiate the choice of the optimal base for seepage prevention curtains along the perimeter of toxic waste storage facilities by clarifying the filtration characteristics of impervious soils using the interpretation of special experimental filtration works, followed by the testing of the effectiveness of engineering solutions using the developed geological filtration model.

**Materials and methods.** Processing Modflow is the software designed for the 3D filtration and pollutant transport modeling. The input data for a geological filtration model included technical reports on engineering surveys conducted in 2013 on the premises of the former Sredne-Volzhsky chemical plant, as well as the results of special experimental and filtration works and plant site level observations interpreted using the ANSDIMAT software.

**Results.** The filtration characteristics of the clay rocks of Upper Quaternary deposits were clarified as a result of the interpretation of special experimental and filtration works by the ANSDIMAT software through graphic analytical methods, and the application of a numerical model by the Processing Modflow software to imitate these works. The resulting characteristics confirmed the usability of this engineering geological element as the base for the designed anti-seepage curtains. The Processing Modflow software was applied to confirm the high efficiency of the filtration prevention circuit, which allowed to significantly reduce inflows in toxic waste storage facilities in the course of their reclamation.

**Conclusions.** In the process of reclamation of the area, occupied by the former Sredne-Volzhsky chemical plant, the option, recommended for implementation, is the installation of anti-seepage curtains around the perimeter of the toxic waste storage facilities for the circuit to be enclosed by the clay rock of the Upper Quaternary deposits. The proposed engineering solution will allow the highly toxic filtrate to be concentrated inside the toxic waste storage facilities to prevent its penetration into the environment.

**KEYWORDS:** anti-seepage curtains, diaphragm wall method, curtain base, toxic waste storage facilities, filtrate, groundwater, surface water, modeling, reclamation

**FOR CITATION:** Solsky S.V., Kotlov O.N., Sobkalov F.P. Justification of the optimal base choice for the anti-filtration circuit during the reclamation of toxic waste storage facilities. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(1):93-105. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.93-105 (rus.).

Corresponding author: Fedor P. Sobkalov, sobkalofp@vniig.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Цель проекта рекультивации [1–3] территории бывшего Средне-Волжского завода химикатов (СВЗХ) в г. Чапаевск Самарской области — ликвидация опасных источников загрязнения экосистемы региона [4, 5]. На указанной территории экологический ущерб многие годы наносит содержимое накопителей высокотоксичных отходов (рис. 1) производств, не имеющих надежной системы инженерной защиты от загрязнения окружающей среды [6–8].

Ключевым проектным решением по рекультивации накопителей, разработанным при участии авторов данной статьи (НПК «ПРОЕКТВОДСТРОЙ», 2014 г.), является создание способом «стена в грунте» по их периметру противофильтрационных завес (ПФЗ), замкнутых на естественные водоупорные слои (аллювиальные верхнечетвертичные глины), с целью минимизации образования новых отходов (загрязненной воды), ликвидации притоков грунтовых вод в котлованы при разработке содержимого отстойников и шламонакопителей, предотвращения загрязнения поверхностных и подземных вод [1–3, 9].

Очевидно, что от характеристик водоупорного основания во многом зависит техническая возможность и технико-экономическая целесообразность устройства противофильтрационного элемента способом «стена в грунте» в этом конкретном случае. При обосновании выбора основания ПФЗ вокруг накопителей токсичных отходов (рис. 1) на СВЗХ решающее значение имели фильтрационные характеристики водоупорных грунтов [9–12].

Анализ архивных сведений и результатов ранее проведенных инженерно-геологических, гидрогеологических изысканий показал (по информации ПК ПИИ «Стройпроект», 2013 г.), что на территории СВЗХ водовмещающими породами служат преимущественно разноразмерные пески

с прослоями и линзами супесей и суглинков — в верхней части разреза и галечников — в нижней части. В качестве водоупора ПФЗ нами рассматривались верхнечетвертичные глины (кровля пласта залегают на глубинах 7,0–16,4 м) и глины верхнего неогена (региональный водоупор мощностью свыше 10 м, залегающий на глубине 30 м).

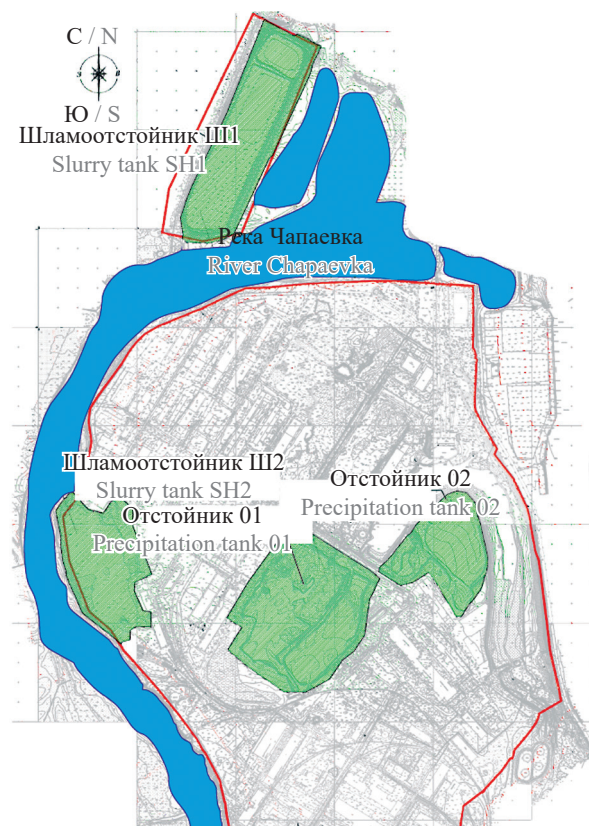


Рис. 1. Рекультивируемые накопители токсичных отходов на территории СВЗХ

Fig. 1. Recultivated toxic waste storage facilities in the territory of the Sredne-Volzhsky chemical plant

Глубокое залегание глин отложений верхнего неогена с идеальными водоупорными характеристиками — главное препятствие для выбора их в качестве основания ПФЗ, так как это серьезно усложняет условия проходки траншеи и удорожает смету создания стенки в грунте.

Особенность водоупорной толщи глинистых пород верхнечетвертичных отложений заключается в том, что она не выдержана по мощности. Толща представлена коричнево-серыми глинами, на некоторых участках — с тонкими прослоями и линзами мелкого песка, с единичными включениями гравия и гальки, супеси, с примесью органического материала, непродачными, ненабухающими. При этом кровля этого инженерно-геологического элемента находится на глубинах 7,0–16,4 м, что при обосновании водоупорных свойств делает его привлекательным в качестве водоупора для создаваемой ПФЗ по сравнению с глинами верхнего неогена. Для выбора в качестве водоупорного основания ПФЗ глинистых пород верхнечетвертичных отложений необходимо было доказать его соответствие нормативам<sup>1</sup> по толщине водоупорного слоя (более 1 м) и противofильтрационным характеристикам.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью решения этой проблемы нами было запланировано проведение специальных опытно-филтрационных работ (ОФР) [9–12] на территории СВЗХ, основные задачи которых:

1. Обоснование возможности использования глин верхнечетвертичных отложений в качестве основания ПФЗ.

2. Получение численного значения вертикального коэффициента филтрации [13–16] песчаных глин для определения расходов грунтовых вод, поступающих через дно котлованов в период расчистки шламоотстойников и шламонакопителей от загрязненного шлама в рамках проекта рекультивации.

Для решения этих задач была разработана программа специальных ОФР, которая реализована в 2014 г.

Анализ архивных материалов показал, что при осуществлении инженерно-геологических изысканий (ИГИ) в 2013 г. на территории СВЗХ осуществлялись первичные опытно-филтрационные опробования. В результате этих работ установлены коэффициенты филтрации аллювиальных средне-четвертичных песков (в среднем — 9 м/сут). По результатам кустовой откачки, выполненной из скважин, фильтры которых оборудованы на прослойке песка в песчаных глинах, получен коэффициент филтрации 2 м/сут. Такой подход не позволил опре-

делить коэффициент филтрации суммарной толщи, представленной глинами с отдельными прослоями песка.

Кроме этого, при проектировании ПФЗ, замкнутых на эти отложения для защиты котлованов, приток в которые через основание будет происходить снизу вверх, необходимо определить коэффициент филтрации вкост напластованию песчаных глин (вертикальный коэффициент филтрации).

Расчеты прогнозного притока грунтовых вод в строительные котлованы базируются на вертикальной филтрации через основание, сложенное суглинками и глинами. Слоистые толщи песчаноглинистых отложений, которые являются основанием накопителей высокотоксичных отходов СВЗХ (котлованов), обладают анизотропией филтрационных свойств, при которой коэффициент филтрации в вертикальном направлении меньше на один-два порядка коэффициента филтрации в горизонтальном направлении.

Подтверждением анизотропии глинистых отложений на территории СВЗХ стало положение уровней в отстойно-регулирующей емкости, основание которой расположено на глинистых отложениях. Несмотря на близкое расположение к р. Чапаевка, уровни в емкости и реке, по данным изысканий, отличаются на несколько метров.

В связи с этим ОФР были направлены на определение коэффициента филтрации глинистых верхнечетвертичных отложений, которые рассматриваются в качестве основного варианта водоупорного основания для котлованов при расчистке шламоотстойников. Вертикальное расположение фильтров скважин в опытных кустах позволило установить не только горизонтальный, но и вертикальный коэффициенты филтрации.

Опытно-филтрационные работы проводились в районе пробуренных при изысканиях скважин № 129 (куст 1) и № 132 (куст 2). Эти участки характеризуются минимальной мощностью песчаных глин, что дает возможность прогнозировать наибольшую приточность грунтовых вод в котлованы при расчистке шламохранилищ и отстойников.

Буровые работы производились силами ПК ПИИ «Сройпроект». Выполнено бурение двух кустов гидрогеологических скважин (табл. 1), каждый из которых состоит из трех скважин (рис. 2, 3), оборудованных фильтрами.

Бурение скважин осуществлялось установкой колонкового бурения типа УРБ-2.5А. В качестве промывочного агента использовался глинистый раствор. Каждая скважина оборудована фильтром. Фильтр представляет собой трубу с щелевой перфорацией, обмотанную защитно-филтрующим материалом (рис. 4).

Перед проведением откачек скважины промывались чистой водой.

<sup>1</sup> СП 45.13330.2017. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87.

Табл. 1. Характеристики кустов скважин для проведения опытно-противофильтрационных работ

Table 1. Characteristics of well clusters designated for experimental filtration prevention work

Характеристика Characteristic	1-й куст / 1st bush			2-й куст / 2nd bush		
	Центральная скважина (ЦС) № 1 (1ц) Central well (CW) No. 1 (1c)	Наблюдательная скважина (НС) № 2 (2н) Observation well (OW) No. 2 (2o)	НС № 3 (3н) OW No. 3 (3o)	ЦС № 4 (1ц) CW No. 4 (1c)	НС № 5 (2н) OW No. 5 (2o)	НС № 6 (3н) OW No. 6 (3o)
Глубина, м Depth, m	21,4	9,3	6,0	22,77	16,85	7,6
Интервал установки фильтра, м Filter installation interval, m	9,9–14,4	7,9–9,1	4,8–5,8	17,7–22,3	15,6–16,6	6,4–7,4
Диаметр бурения, мм Drilling diameter, mm	245	245	245	245	245	245
Диаметр обсадных труб, мм Diameter of casing pipes, mm	159	159	159	159	159	159
Расстояние от центральной скважины, м Distance from the central well, m	—	6,47	5,26	—	4,71	5,35

Примечание: Рабочая часть фильтра — с обсыпкой. Затрубное пространство затампонировано бентонитом для исключения перетекания грунтовых вод. Длина фильтра — 1 м.

Note: The effective part of the filter has a cushioning layer. The annular space is plugged with bentonite to prevent the overflow of groundwater. The filter length is 1 m.

### Методика проведения опытных кустовых откачек

Опытные кустовые откачки выполнялись<sup>2</sup> нами погружным насосом «Водолей» из скважин № 1 (куст 1), № 4 (куст 2).

Перед началом опытной откачки на каждом кусте проводилась пробная откачка продолжительностью 5 ч при различных режимах работы насоса с целью определения параметров опытной откачки — дебита откачки, режима проведения замеров уровня и дебита.

Наблюдательные и центральные скважины были оборудованы автоматическими датчиками гидростатического давления (Level-troll 500). Датчики синхронизированы по времени, частота замеров датчиков в центральной скважине составляла 20 с, в наблюдательных — 60 с. Для измерения расхода откачки применялся мерный сосуд объемом 10 л.

Непосредственно перед включением насоса уровнемером во всех скважинах производилось измерение начального статического уровня. В процессе откачек объемным методом фиксировался дебит

откачки с периодичностью 1 раз в 2 ч (4 ч ночью), а также уровнемером — положение уровней в скважинах 1 раз в 4–6 ч (рис. 5). Продолжительность откачек на кусте 1 — 18 ч, на кусте 2 — 8 ч.

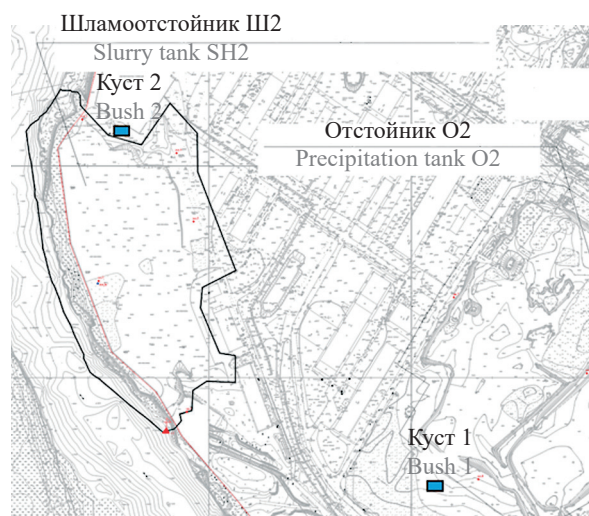


Рис. 2. Схема расположения опытных кустов скважин на территории СВЗХ

Fig. 2. The layout of experimental well clusters in the territory of the Sredne-Volzhskiy chemical plant

<sup>2</sup>ГОСТ 23278-2014. Грунты. Методы полевых испытаний проницаемости. М. : Стандартинформ,

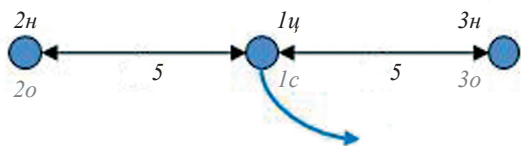


Рис. 3. Схема расположения скважин опытного куста  
Fig. 3. The layout of the wells of the experimental cluster



Рис. 4. Используемый сетчатый фильтр с щелевой перфорацией  
Fig. 4. A sieve filter having slotted perforation



Рис. 5. Измерение начального статического уровня, а в последующем — понижения уровня  
Fig. 5. The process of measuring the initial static level and further level reduction

После окончания откачки осуществлялось наблюдение за восстановлением уровня в центральной и наблюдательных скважинах. Наблюдения велись до полного восстановления уровня во всех наблюдательных скважинах.

#### Методика интерпретации опытных откачек

Интерпретация результатов опытных откачек заключалась в совместном подборе филь-

трационных характеристик водоносных горизонтов и водоупоров графоаналитическим методом в программе ANSDIMAT [17] и на геофильтрационной модели.

Графоаналитическим методом определялись предварительные фильтрационные параметры по результатам проведенных откачек. Критерием принимаемых параметров стало совпадение расчетной кривой с фактическим графиком понижения воды при откачках. Далее при имитации опытной откачки на геофильтрационной модели эти параметры задавались в соответствующие блоки модели и уточнялись. Критерием сходимости являлось совпадение понижений по наблюдательным скважинам с понижениями, полученными в результате моделирования.

В качестве программного обеспечения для построения геофильтрационной модели участка применялся современный программный пакет Processing Modflow (USGS, США) [18–20].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Результаты интерпретации откачек графоаналитическим способом

Интерпретация кустовых опытных откачек производилась по показателям понижений и восстановления уровней в центральной и наблюдательных скважинах.

В ходе обработки данных откачек был получен ряд параметров, включающих проводимость водоносных пластов  $T$ , водоотдачу, параметры перетекания  $B$ . Используя эти параметры, выполнен расчет вертикального коэффициента фильтрации слабопроницаемого разделяющего слоя  $Kф$  с помощью зависимости:

$$B = \sqrt{\frac{Tm}{Kф}} \rightarrow Kф = \frac{Tm}{B^2},$$

где  $B$  — параметр перетекания;  $T$  — проводимость водоносного слоя;  $m$  — мощность слабопроницаемого разделяющего слоя;  $Kф$  — коэффициент фильтрации слабопроницаемого разделяющего слоя (вертикальный).

Результаты интерпретации откачек представлены в табл. 2, 3.

Полученные коэффициенты фильтрации слабопроницаемого разделяющего слоя относятся к вертикальной составляющей, так как при кустовой откачке создавался вертикальный фильтрационный поток.

Значения коэффициентов фильтрации по кусту 1 составили от  $6 \cdot 10^{-4}$  до  $5 \cdot 10^{-3}$  м/сут. Для куста 2 коэффициенты фильтрации меняются от  $1 \cdot 10^{-5}$  до  $3 \cdot 10^{-4}$  м/сут.

Для расчетов было принято среднее значение вертикального коэффициента фильтрации по кусту № 1 —  $10^{-3}$  м/сут.

Табл. 2. Результаты интерпретации данных опытной откачки в кусте № 1

Table 2. Results of interpretation of experimental pumping data in bush № 1

Параметры Parameters	Схема — перетекание с учетом емкости разделяющего слоя The process diagram: the overflow with account taken of the capacity of the separating layer		Схема — перетекание из водоносного пласта с изменяющимся напором The process diagram: the overflow from the aqueous layer featuring varying pressure values	
	Откачка Pumping	Восстановление Recovery	Откачка Pumping	Восстановление Recovery
Куст 1. Скважина 1ц Cluster 1. Well 1c				
$T_1$ , м <sup>2</sup> /сут m <sup>2</sup> /day	11	11	10	9
$T_2$ , м <sup>2</sup> /сут m <sup>2</sup> /day	—	—	8	8
Кф, м/сут Filtration coefficient, m/day	$7 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$
Куст 1. Скважина 2н Cluster 1. Well 2o				
$T_1$ , м <sup>2</sup> /сут m <sup>2</sup> /day	50	60	60	65
$T_2$ , м <sup>2</sup> /сут m <sup>2</sup> /day	—	—	50	50
Кф, м/сут Filtration coefficient, m/day	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Куст 1. Скважина 3н Cluster 1. Well 3o				
$T_1$ , м <sup>2</sup> /сут, m <sup>2</sup> /day	65	60	60	65
$T_2$ , м <sup>2</sup> /сут, m <sup>2</sup> /day	—	—	60	50
Кф, м/сут Filtration coefficient, m/day	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$

### Результаты имитации опытных откачек на численной модели

Следующим этапом интерпретации результатов опытных кустовых откачек являлось уточнение полученных с помощью графоаналитического метода фильтрационных параметров.

Для имитации опытной откачки были созданы численные геофильтрационные модели опробуемого слоистого четвертичного комплекса, на которых воспроизводились условия опытных откачек.

Геофильтрационная модель представляет собой участок размером 1000 × 1000 м, разбитый на блоки различного размера. Размеры блоков меняются от 50 м на края модели и 0,1 м — в центральной части (рис. 6), где заданы опытные и наблюдательные скважины. В профиле на модели задано положение водоносных горизонтов и водоупоров в соот-

ветствии с результатами бурения скважин опытных кустов, также учитывалось расстояние между скважинами и положение рабочих частей фильтров.

При моделировании блок, соответствующий положению фильтра скважины, задан с помощью модуля «well» расхода опытной откачки.

Достоверность определяемых фильтрационных параметров контролировалась сравнением расчетных и фактических понижений в наблюдательных скважинах (рис. 7).

В результате имитационного моделирования удалось уточнить следующие фильтрационные параметры:

- проводимость основного водоносного горизонта  $T$ ;
- коэффициент фильтрации песков основного водоносного горизонта  $k_1$ ;

- горизонтальный коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя  $k_x$ ;
- вертикальный коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя  $k_z$ .

В табл. 4 представлены уточненные в результате имитационного моделирования параметры, которые были использованы в дальнейшем для расчетов.

Для уточнения притока грунтовых вод в котлованы при разработке отстойника сточных вод (О2) и отстойно-регулирующей емкости (О1) применены фильтрационные параметры по опытному кусту 1, а для шламоотстойника (Ш2) — фильтрационные параметры по кусту 2.

### Уточнение расходов грунтовых вод, поступающих в котлованы на разработанной геофильтрационной модели

На созданной геофильтрационной модели выполнен прогноз расходов грунтовых вод, поступающих в котлованы на этапе рекультивации территории СВЗХ, с использованием фильтрационных

характеристик, полученных в результате опытных откачек.

Уточнение расходов производилось на локальных, детально описывающих гидрогеологические условия моделях, являющихся «врезками» в общую геофильтрационную модель участка строительства ПФЗ. При этом данные калибровки общей модели задавались как граничные условия локальных моделей. Такой подход позволил детально имитировать условия разгрузки подземных вод в строительные котлованы.

Моделируемая площадь охватывает территорию бывшего СВЗХ и находится на западной окраине г. Чапаевск. Размеры моделируемой области составляют 4,5 км<sup>2</sup>. Моделируемая область в плане разбита на строки и колонки. Размер блоков в основной части модели 50 × 50 м, непосредственно в пределах участка производства работ размер блоков составляет 5 × 5 м, на врезках размер блоков уменьшен до 2 × 2 м.

Табл. 3. Результаты интерпретации данных опытной откачки в кусте № 2

Table 3. Results of interpretation of experimental pumping data for Cluster 2

Параметры Parameters	Схема — перетекание с учетом емкости разделяющего слоя The process diagram: the overflow with account taken of the capacity of the separating layer		Схема — перетекание из водоносного пласта с изменяющимся напором The process diagram: the overflow from the aqueous layer featuring varying pressure values	
	Откачка Pumping	Восстановление Recovery	Откачка Pumping	Восстановление Recovery
Куст 2. Скважина 1ц Bush 2. Well 1c				
$T_1$ , м <sup>2</sup> /сут m <sup>2</sup> /day	9	13	9	13
$T_2$ , м <sup>2</sup> /сут m <sup>2</sup> /day	—	—	5	12
Кф, м/сут Filtration coefficient, m/day	$4 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Куст 2. Скважина 2н Bush 2. Well 2o				
$T_1$ , м <sup>2</sup> /сут m <sup>2</sup> /day	7	6	12	55
$T_2$ , м <sup>2</sup> /сут m <sup>2</sup> /day	—	—	10	50
Кф, м/сут Filtration coefficient, m/day	$5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Куст 2. Скважина 3н Bush 2. Well 3o				
$T_1$ , м <sup>2</sup> /сут m <sup>2</sup> /day	60	—	120	—
$T_2$ , м <sup>2</sup> /сут m <sup>2</sup> /day	—	—	110	—
Кф, м/сут Filtration coefficient, m/day	$2 \cdot 10^{-5}$	—	$2 \cdot 10^{-4}$	—

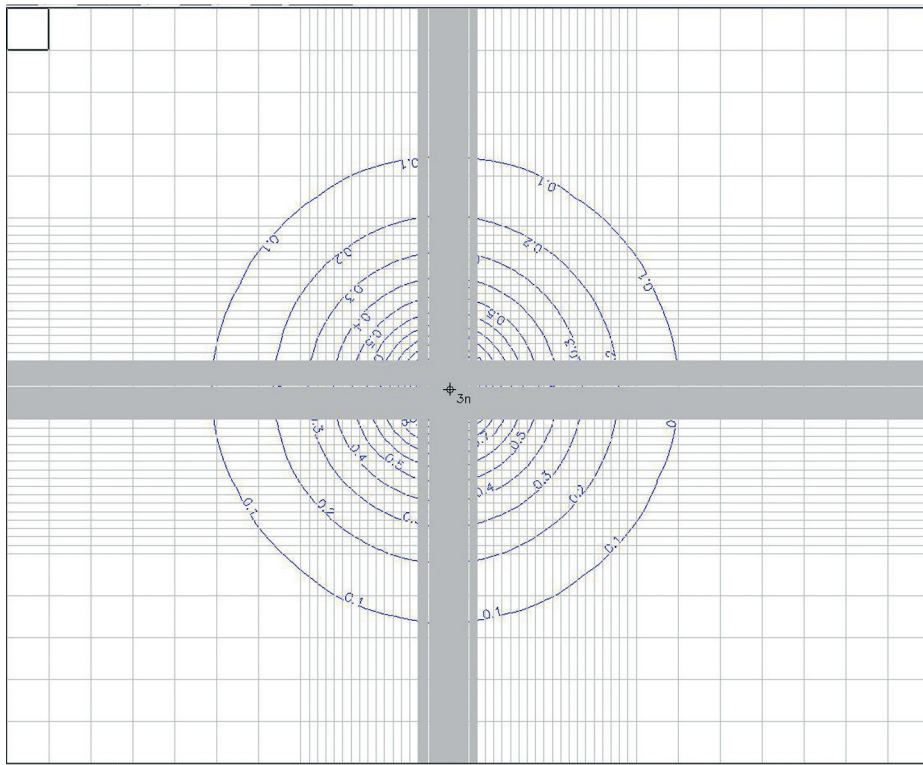


Рис. 6. Вид депрессионной поверхности в результате имитации опытной откачки

Fig. 6. A view of the depression surface as a result of the simulation of experimental pumping

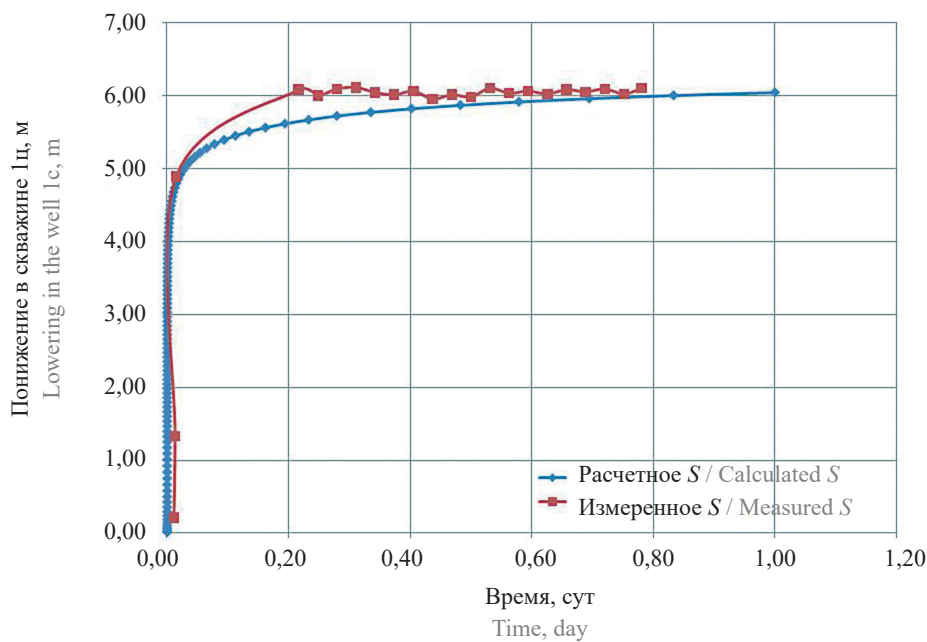


Рис. 7. Сравнение расчетных и фактических понижений в скважине 1ц (куст 1)

Fig. 7. Comparison between the calculated and actual depression in well 1c (Cluster 1)

На численной геофильтрационной модели толща четвертичных отложений представлена тремя слоями. Первый слой соответствует положению водоносных отложений горизонта грунтовых вод (ИГЭ 1, 2, 3). Второй слой — водоупорным суглинкам и супесям (ИГЭ 4, 5, 6, 7). Третий слой — напорному водоносному горизонту (ИГЭ 8, 9). Све-

дения о профильной разбивке модели приведены в табл. 5. Мощности отложений были приняты по данным ИГИ.

В рамках ИГИ (по данным ПК ПИИ «Стройпроект») опытно-фильтрационными работами опробованы пески напорного водоносного горизонта. Полученные коэффициенты фильтрации находятся

в широких пределах от 1,4 до 14,4 м/сут, в связи с этим для базовой модели принят средний коэффициент фильтрации 8 м/сут.

По фильтрационным характеристикам водонасыщенных отложений грунтовых вод и водоупорным грунтам в результатах изысканий сведений не приведено. Поэтому для базовой численной модели приняты коэффициенты фильтрации, характерные для такого типа грунтов.

В качестве граничных условий, учитывающих условия питания и разгрузки подземных вод, на модели заданы границы III рода с помощью модуля «rivers» (река) в блоках, соответствующих положению р. Чапаевка. По всей площади модели задано инфильтрационное питание с величиной 0,0001 м/сут.

С учетом данных об уровненом режиме подземных вод при составлении базовой численной модели верхний слой принимался как безнапорный пласт, а нижние слои рассматривались в качестве напорно-безнапорных в зависимости от положения уровня подземных вод.

В результате калибровки модели определены уровни грунтовых вод в районе накопителя промышленных отходов и отстойника сточных вод, находящиеся на отметках 29–31 м, фильтрационный поток направлен в различные стороны, в зависимо-

сти от условий расположения объектов. На участке шламоотстойника, расположенного вблизи берега р. Чапаевка, абсолютные отметки уровней грунтовых вод не превышают 29–30 м. В связи с близким расположением р. Чапаевка, уровни подземных вод на этом участке находятся в тесной взаимосвязи с уровнем воды в реке.

Выполненный ранее прогноз основывался на фильтрационных параметрах, полученных в результате ИГИ без учета анизотропии песчано-глинистых отложений. На локальных моделях заданы уточненные фильтрационные характеристики с учетом анизотропии слабопроницаемого слоя. Так же, как и на общей модели, ПФЗ заданы с помощью модуля «wall», а внутри ПФЗ для имитации котлованов задан модуль «дрена» с отметками, соответствующими положению дна котлованов.

В табл. 6 приведены величины расходов грунтовых вод, поступающих в строительные котлованы без ПФЗ и после создания ПФЗ по периметру каждого из четырех накопителей токсичных отходов СВЗХ. По результатам видно, что устройство ПФЗ позволяет в 3–17 раз снизить расходы грунтовых вод, поступающих в строительные котлованы в период выемки загрязненных отходов из накопителей и отправки их на термообезвреживание.

Табл. 4. Фильтрационные параметры, полученные в результате имитационного моделирования

Table 4. Filtration parameters obtained as a result of simulation

Параметр Parameter	Куст 1 Cluster 1	Куст 2 Cluster 2
Проводимость основного водоносного горизонта $T$ , м <sup>2</sup> /сут Water supply capacity of the main aquifer $T$ , m <sup>2</sup> /day	12,1	12,5
Коэффициент фильтрации песков основного водоносного горизонта $k_1$ , м/сут Filtration coefficient of the sands in the main aquifer $k_1$ , m/day	2,2	2,5
Горизонтальный коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя $k_x$ , м/сут Horizontal filtration coefficient of the aquitard layer $k_x$ , m/day	0,1	0,002
Вертикальный коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя $k_z$ , м/сут Vertical filtration coefficient of the aquitard layer $k_z$ , m/day	0,001	0,0001

Табл. 5. Профильная разбивка модели

Table 5. Profiled breakdown of the model

Номер слоя Layer number	Геологический индекс Geological index	Литологическое описание Lithological description	Абсолютная отметка подошвы, м Absolute mark of the sole, m
1	$Q_{IV}$	Пески и техногенные грунты Sands and man-made soils	23–35
2	$Q_{III}$	Глины и суглинки Clays and loams	14–26
3	$Q_{III}-Q_{II}hz$	Пески мелкие Fine sands	10–14

Табл. 6. Расходы потоков грунтовых вод, поступающих в котлованы

Table 6. Expenses of groundwater flows entering the pits

Строительные котлованы Construction pits	Расход потока грунтовых вод без ПФЗ Groundwater flow rate without a filtration curtain		Расход потока грунтовых вод с ПФЗ Groundwater flow rate with a filtration curtain	
	м <sup>3</sup> /сут m <sup>3</sup> /day	л/сек l/sec	м <sup>3</sup> /сут m <sup>3</sup> /day	л/сек l/sec
Шламоотстойник Ш2 Slurry tank Sh2	129,1	1,49	20,8	0,24
Отстойник О1 Precipitation tank O1	80,3	0,93	9,4	0,11
Отстойник О2 Precipitation tank O2	386,2	4,47	124,4	1,44
Шламоотстойник Ш1 Slurry tank Sh1	44,5	0,52	2,7	0,03

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнен комплексный анализ инженерно-геологических, гидрогеологических и гидрологических условий территории размещения накопителей СВЗХ, на основании которого сделан вывод о неверной интерпретации результатов ранее выполненных результатов ОФР, что привело к существенному завышению коэффициента фильтрации глинистых пород верхнечетвертичных отложений, приведены доказательства о возможности использования этого инженерно-геологического элемента в качестве основания проектируемого противofiltrационного контура накопителей.

Запланированы и проведены в соответствии с разработанной программой ОФР на глинистых породах верхнечетвертичных отложений, выполнена интерпретация результатов откачек графоаналитическим методом и имитация опытных откачек

на численной модели, которые подтвердили существующую анизотропию коэффициента фильтрации этого инженерно-геологического элемента (ИГЭ 7 и ИГЭ 7а), установлено значение горизонтального Кф, составившего 0,1–0,002 м/сут, и вертикального Кф, составившего 0,001–0,0001 м/сут.

На разработанной и откалиброванной по данным натурных наблюдений за уровнем режимом площадки СВЗХ геofiltrационной модели уточнены расходы поступления грунтовых вод в котлованы, подтвердившие высокую эффективность проектируемой противofiltrационной защиты открытых выработок, с использованием в качестве горизонтального основания глинистых пород верхнечетвертичных отложений (ИГЭ 7 и ИГЭ 7а), ранее не рассматривавшихся в этом качестве, которая позволяет на порядок уменьшить объемы фильтрационных протечек, подлежащих перекачке на утилизацию.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Котлов О.Н., Собкалов Ф.П., Сольский С.В., Таскаева С.Х. Обоснование проектных решений по рекультивации накопителей токсичных отходов на территории бывшего завода химикатов в г. Чапаевск // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2020. Т. 296. С. 58–79.

2. Собкалов Ф.П. Создание противofiltrационного элемента из местных глинистых грунтов для рекультивации накопителей токсичных отходов // Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии: восьмая науч.-техн. конф.: приложение на CD-диске: доклады и выступления на секциях конференции. 2015. С. 308–310.

3. Собкалов Ф.П. Создание противofiltrационной завесы из местных глин для рекультивации

накопителей токсичных отходов // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2014. Т. 274. С. 74–84.

4. Сольский С.В. Вторичное освоение техногенно-нагруженных территорий. Проблемы и решения. СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2011. 323 с.

5. Сольский С.В. Инженерная защита вод в природно-технических системах на техногенно-нагруженных территориях: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2007. 313 с.

6. Чертес К.Л., Тупицына О.В., Пыстин В.Н., Шишкин В.Я., Михасек А.А., Петренко Е.Н. и др. Геоинженерная защита территорий, нарушенных объектами накопленного экологического вреда // Экология

и промышленность России. 2020. Т. 24. № 4. С. 10–15. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-4-10-15

7. Тупицына О.В., Гладышев Н.Г., Кузнецова М.С., Пирожков Д.А., Чертес Л.К., Тарасова И.В. и др. Реабилитация территорий, деградированных в результате деятельности опасных производств // Экология и промышленность России. 2011. № 3. С. 30–32.

8. Тупицына О.В., Чертес К.Л., Быков Д.Е. Освоение природно-техногенных систем градопромышленных агломераций : монография. Самара : ООО «Издательство Ас Гард», 2014. 320 с.

9. Козуб Ю.Г., Котлов О.Н. Способ локализации очага загрязнения подземных вод // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 294. С. 31–43.

10. Козуб Ю.Г., Котлов О.Н. Опытнo-фильтрационные и миграционные работы для обоснования технических решений проекта реконструкции хвостохранилища Куранахской золотоизвлекательной фабрики // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : мат. докл. Четырнадцатой Общерос. науч.-практ. конф. и выставки изыскательских организаций. 2018. С. 434.

11. Glagovsky V., Kotlov O., Kozub Y. Assessment of the mutual hydrodynamic effect of closely spaced hydroelectric complexes using numerical modeling // Proceedings of the Fourth International DAM WORLD Conference. 2020. Vol. 1. P. 651–663.

12. Норватов Ю.А., Петрова И.Б., Сергушин М.В., Шамшаев А.А. Повышение информативности опытных откачек, проводимых при инженерных изысканиях, при помощи численного геофильтрационного моделирования // Инженерные изыскания. 2015. № 5–6. С. 24–29.

13. Slesarev M. Environmental graphic method for creating area of permissible impact // IOP Conference

Series Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. Issue 2. P. 022055. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022055

14. Slesarev M. Mathematical modeling of environmental loads at stages of construction object // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. Issue 2. P. 022038. DOI: 10.1088/1757-899x/365/2/022038

15. Slesarev M. The computer modeling concept in the paradigm of Green Standardization of ecological construction // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. Issue 1. P. 012126. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012126

16. Ковригин А.А., Слесарев М.Ю. Модель изменения гидротехнических характеристик территории полигона твердых промышленных и бытовых отходов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 6. С. 770–780. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.770-780

17. Сундаловский Л.Н. ANSDIMAT программный комплекс для определения параметров водонесных пластов. СПб. : Наука, 2011.

18. Reilly T.E., Harbaugh A.W. Guidelines for evaluating ground-water flow models. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5038. 2004. 30 p.

19. Harbaugh A.W. MODFLOW-2005: the U.S. Geological Survey modular ground-water model — the ground-water flow process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, variously p. 2005.

20. Расторгуев И.А., Мухина Л.Н., Ермакова Д.А. Использование программных комплексов DHI Feflow и Processing Modflow при решении задач геофильтрации на территории строящихся гидротехнических сооружений и их реконструкции в сложных геологических и гидрогеологических условиях // Гидротехническое строительство. 2021. № 1. С. 47–54.

Поступила в редакцию 6 декабря 2021 г.

Принята в доработанном виде 31 января 2022 г.

Одобрена для публикации 31 января 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: **Станислав Викторович Сольский** — доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Фильтрационные исследования им. Н.Н. Павловского»; **Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева (ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева)**; 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21; РИНЦ ID: 440918, Scopus: 56611957100; solskiysv@vniig.ru;

**Олег Николаевич Котлов** — кандидат геолого-минералогических наук, начальник отдела «Основания, грунтовые и подземные сооружения»; **Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева (ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева)**; 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21; РИНЦ ID: 672069; KotlovON@vniig.ru;

**Федор Петрович Собкалов** — научный сотрудник лаборатории «Фильтрационные исследования им. Н.Н. Павловского»; **Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева (ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева)**; 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21; РИНЦ ID: 811378; sobkalovfp@vniig.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Solskiy S.V., Kotlov O.N., Sobkalov F.P., Taskayeva S.Kh. Justification of design solutions for reclamation of waste ponds in territory of former chemical plant in Chapayevsk. *Proceeding of the VNIIG*. 2020; 296:58-79. (rus.).
2. Sobkalov F.P. Creation of an impervious element from local clayey soils for the reclamation of toxic waste accumulators. *Gidroenergetika. New developments and technologies: the eighth scientific and technical conference: an appendix on a CD-ROM: reports and speeches at the sections of the conference*. 2015; 308-310. (rus.).
3. Sobkalov F.P. Creation of anti-seepage curtain made of local clay for rehabilitation of toxic waste storages. *Proceeding of the VNIIG*. 2020; 274:74-84. (rus.).
4. Solskiy S.V. *Secondary development of technogenically-loaded territories. Problems and solutions*. St. Petersburg, Publishing house JSC "Vedeneev VNIIG", 2011; 323. (rus.).
5. Solskiy S.V. *Engineering protection of waters in natural and technical systems in technogenically-loaded territories: dis. ... of the doctor of technical sciences*. St. Petersburg, 2007; 313. (rus.).
6. Chertes K.L., Tupitsyna O.V., Pystin V.N., Shishkin V.Ya., Mikhasek A.A., Petrenko E.N. et al. Geoengineering protection of territories violated by objects of accumulated environmental damage. *Ecology and Industry of Russia*. 2020; 24(4):10-15. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-4-10-15 (rus.).
7. Tupitsyna O.V., Gladyshev N.G., Kouznetsova M.S., Peerozhkov D.A., Chertes L.K., Tarasova I.V. et al. Rehabilitation of the areas degraded by activities of hazardous industries. *Ecology and Industry of Russia*. 2011; 3:30-32. (rus.).
8. Tupitsyna O.V., Chertes K.L., Bykov D.E. *Development of natural-technogenic systems of urban-industrial agglomerations: monograph*. Samara, LLC. "Publishing House As Gard", 2014; 320. (rus.).
9. Kozub Yu.G., Kotlov O.N. Method for containment of ground water contamination source. *Proceeding of the VNIIG*. 2019; 294:31-43. (rus.).
10. Kozub Yu.G., Kotlov O.N. Experimental filtration and migration work to substantiate the technical solutions of the project of reconstruction of the tailings storage of the Kuranakh gold recovery plant. *Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation: materials of the reports of the Fourteenth All-Russian scientific and practical conference and exhibition of survey organizations*. 2018; 434. (rus.).
11. Glagovsky V., Kotlov O., Kozub Y. Assessment of the mutual hydrodynamic effect of closely spaced hydroelectric complexes using numerical modeling. *Proceedings of the Fourth International DAM WORLD Conference*. 2020; 1:651-663.
12. Norvatov Yu.A., Petrova I.B., Sergutin M.V., Shamshev A.A. Informativeness improvement of pumping tests for engineering surveys by numerical geoseepage modeling. *Engineering Survey*. 2015; 5-6:24-29. (rus.).
13. Slesarev M. Environmental graphic method for creating area of permissible impact. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018; 365(2):022055. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022055
14. Slesarev M. Mathematical modeling of environmental loads at stages of construction object. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018; 365(2):022038. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022038
15. Slesarev M. The computer modeling concept in the paradigm of Green Standardization of ecological construction. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2018; 456(1):012126. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012126
16. Kovrigin A.A., Slesarev M.Yu. A change model of the hydraulic characteristics of the territory occupied by the landfill of solid industrial and domestic waste. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021; 16(6):770-780. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.770-780 (rus.).
17. Sindalovskiy L.N. *ANSDIMAT — a software package for determining the parameters of aquifers*. St. Petersburg, Nauka, 2011. (rus.).
18. Reilly T.E., Harbaugh A.W. *Guidelines for evaluating ground-water flow models*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5038. 2004; 30.
19. Harbaugh A.W. *MODFLOW-2005: the U.S. Geological Survey modular ground-water model — the ground-water flow process*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, variously p. 2005.
20. Rastorguev I.A., Mukhina L.N., Ermakova D.A. Software DHI Feflow и Processing Modflow in solving groundwater flow problems for hpp projects design and reconstruction in complex geological and hydrogeological environment. *Hydraulic Engineering Construction Magazine*. 2021; 1:47-54. (rus.).

Received December 6, 2021.

Adopted in revised form on January 31, 2021.

Approved for publication on January 31, 2021.

**BIONOTES:** **Stanislav V. Solsky** — Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Laboratory the N.N. Pavlovsky Filtrational Research; **All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneev (VNIIG named after B.E. Vedeneev)**; 21 Gzhatskaya st., Saint Petersburg, 195220, Russian Federation; ID RISC: 440918, Scopus: 56611957100; solskiysv@vniig.ru;

**Oleg N. Kotlov** — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Department of Foundations, Ground and Underground Structures; **All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneev (VNIIG named after B.E. Vedeneev)**; 21 Gzhatskaya st., Saint Petersburg, 195220, Russian Federation; ID RISC: 672069; KotlovON@vniig.ru;

**Fedor P. Sobkalov** — Research Fellow of the Laboratory the N.N. Pavlovsky Filtrational Research; **All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneev (VNIIG named after B.E. Vedeneev)**; 21 Gzhatskaya st., Saint Petersburg, 195220, Russian Federation; ID RISC: 811378; sobkalovfp@vniig.ru.

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

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

## Обоснование необходимости проведения гидродинамической очистки самотечных сетей водоотведения

Олег Александрович Продоус<sup>1</sup>, Дмитрий Иванович Шлычков<sup>2</sup>,  
Иванна Александровна Абросимова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИИКО-ЭКСПЕРТ; г. Санкт-Петербург, Россия;

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

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Известно, что эксплуатация очистных сооружений канализации требует значительного объема энергозатрат, это: насосное оборудование, автоматизированная система управления, освещение, отопление, вентиляция и т.п. Для обеспечения надежной работы напорных трубопроводов водоотведения необходим расчет параметров потока и организация соответствующей защиты данных сооружений от резких повышений давления (гидравлических ударов), которые при подаче сточных вод имеют свои особенности. Предлагаемая методика расчета основных гидродинамических параметров при гидравлическом ударе учитывает многофазность этого напорного потока. Гидродинамическая очистка водопроводных сетей и сетей водоотведения предусматривает использование специальной техники, применяемой для очистки труб из любых видов материалов диаметром более 150 мм. Процесс гидродинамической очистки сетей дорогой и трудоемкий. Поэтому предлагается проводить предварительно обоснование необходимости такой дорогостоящей операции. Цель исследования — установка характеристик труб, по которым можно судить о потребности их гидравлической очистки от слоя внутренних отложений.

**Материалы и методы.** Используются расчетные зависимости, выведенные авторами для гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения.

**Результаты.** Подтверждено существование зависимости уровня фактического наполнения труб от толщины слоя осадка в их лотковой части. Приведен конкретный пример, подтверждающий существование такой зависимости. Представлен график зависимости фактического уровня наполнения труб от толщины слоя отложений в их лотковой части и зависимость величины гидравлического уклона от толщины фактического слоя осадка.

**Выводы.** Показано, что для приведенного примера обосновано проведение гидродинамической очистки труб при толщине слоя осадка в их лотковой части более 70 мм.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** сети водоотведения, внутренние отложения, наполнение труб, толщина слоя отложений, гидравлический расчет, гидравлический потенциал, гидродинамическая очистка

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Продоус О.А., Шлычков Д.И., Абросимова И.А. Обоснование необходимости проведения гидродинамической очистки самотечных сетей водоотведения // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 1. С. 106–114. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.106-114

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Иванович Шлычков, SHlyichkovDI@mgsu.ru.

## Justification of the need for the hydrodynamic cleaning of gravity water discharge networks

Oleg A. Prodous<sup>1</sup>, Dmitriy I. Shlychkov<sup>2</sup>, Ivanna A. Abrosimova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> INCO-EXPERT; St. Petersburg, Russian Federation;

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

### ABSTRACT

**Introduction.** It is widely known that the operation of sewage treatment facilities requires a significant amount of energy, consumed by the pumping equipment, the automated control system, lighting, heating, ventilation, etc. To ensure the reliable operation of pressure sewerage pipelines, it is necessary to analyze the flow parameters and adequately protect these structures from pressure surges (fluid shocks), that demonstrate unique features in the process of wastewater discharge. The proposed method of analyzing principal hydrodynamic parameters in case of a fluid shock takes into account the multi-phase nature of the pressure flow. The hydrodynamic cleaning of water supply and sewerage networks involves special equipment used to clean pipes, having the diameter of over 150 mm which are made of any material. The process of the hydrodynamic cleaning of networks is expensive and laborious. Therefore, the authors of the article propose to prepare a preliminary justification report for such an expensive operation. The purpose of the research is to identify the pipe characteristics, that can justify the application of the hydraulic method for the removal of a layer of internal deposits.

**Materials and methods.** Dependencies, derived by the authors for the purpose of the hydraulic analysis of gravity drainage networks, are used in the article.

**Results.** Dependence between the actual pipe filling and the thickness of the sediment layer in the pipe gully was confirmed. A specific example is provided by the authors to confirm the existence of such a dependence. The graph shows dependence between the actual pipe filling level and the thickness of the sediment layer in the gully and dependence between the value of the hydraulic slope and the thickness of the actual sediment layer.

**Conclusions.** It is shown that the hydrodynamic cleaning of pipes, having a gully sediment layer exceeding 70 mm, is justified for the case analyzed in the article.

**KEYWORDS:** sewerage networks, internal sediments, pipe filling, sediment layer thickness, hydraulic analysis, hydraulic potential, hydrodynamic cleaning

**FOR CITATION:** Prodous O.A., Shlychkov D.I., Abrosimova I.A. Justification of the need for the hydrodynamic cleaning of gravity water discharge networks. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(1):106-114. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.106-114 (rus.).

Corresponding author: Dmitriy I. Shlychkov, SHlychkovDI@mgsu.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время эксплуатация самотечных сетей водоотведения осуществляется с применением инновационных технологий и новейших достижений современной науки и техники. Специалистами, занимающимися эксплуатацией водоотводящих сетей, установлено, что при минимальных скоростях потока сточных вод происходит образование слоя отложений, особенно в трубопроводах больших диаметров, что приводит к значительному увеличению эксплуатационных расходов.

Гидравлический расчет канализационных сетей до 1956 г. выполнялся по тем же формулам, что и водопроводных, но коэффициенты шероховатости труб и каналов принимались несколько повышенными. Существовавшие до 1956 г. методы расчетов канализационных сетей не учитывали физико-химического состава сточных вод.

Большой вклад в разработку методики гидравлического расчета канализационных сетей внесли профессор Н.Ф. Федоров и Л.Е. Волков, издав в 1968 г. таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей [1, 2]. В своих расчетах они опирались на формулу Антуана Шези, открытую в 1779 г. Формула широко используется как в европейских странах, так и в России, однако она не учитывает значения скорости потока  $V$  при образовании слоя отложений  $h$  в лотковой части труб.

На сегодняшний день требуется осуществлять гидродинамическую очистку водопроводных сетей и сетей водоотведения с помощью специальной техники, применяемой для очистки труб из любых видов материалов диаметром более 150 мм. Процесс гидродинамической очистки сетей дорогой и трудоемкий. Поэтому авторами статьи предлагается проводить предварительно обоснование необходимости выполнения такой дорогостоящей операции [3, 4].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно правилам пользования системами коммунального водоснабжения и канализации в РФ, трубопроводы систем подачи питьевой и отведения сточной жидкости должны периодически подвер-

гаться гидродинамической очистке от слоя внутренних отложений, изменяющего значения характеристик гидравлического потенциала<sup>1,2</sup> труб  $d_{\text{вн}}$ ,  $V$  и  $i$  [5]. Рассмотрим самотечные сети водоотведения.

Потребность в гидродинамической очистке самотечных сетей водоотведения обусловлена возникновением в лотковой части труб слоя отложений  $h$ , при условии, когда  $V_{\text{ф}} < V_{\text{мин}}$ , регламентированной требованиями СП 32.13330.2012 [6].

При этом слой накапливаемого осадка в лотковой части труб влияет на изменение уровня накопления в трубах  $H_{\text{ф}}$ , как показано на рис. 1.

Критерии для обоснования необходимости проведения гидродинамической очистки самотечных сетей водоотведения до настоящего времени не разработаны [7]. Авторы данной статьи предлагают проводить обязательное обоснование необходимости осуществления гидродинамической очистки сетей водоотведения по двум показателям:

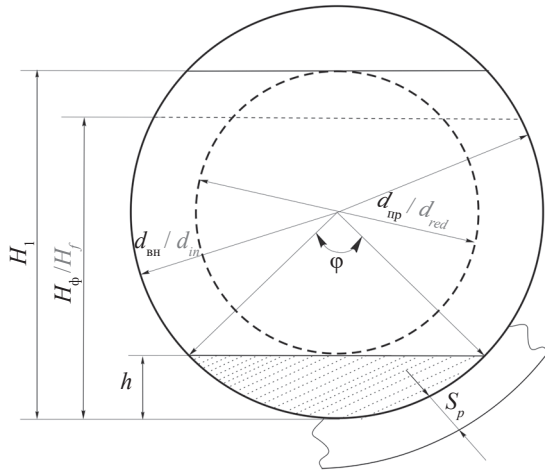
- уровню фактического наполнения сети  $H_{\text{ф}}$  (рис. 1);
- толщине слоя осадка  $h$  в лотковой части труб.

Экспертно установлено, что в процессе жизненного цикла «Эксплуатация», чем больше значение  $H_{\text{ф}}$ , тем больше толщина слоя осадка  $h$  в лотковой части труб. При этом прирост значения величины  $H_{\text{ф}}$  всегда равен значению толщины слоя осадка  $h$  в лотковой части труб [8].

С целью контроля значений толщины слоя осадка  $h$  в процессе эксплуатации сетей авторами разработано и запатентовано специальное устройство [9]. Контроль значений толщины слоя осадка  $h$  с помощью такой установки не вызывает каких-либо трудностей. Покажем на примере существование графической зависимости  $H_{\text{ф}} = f(h)$  для условий следующей задачи.

<sup>1</sup> Правила пользования системами коммунального водоснабжения и канализации в Российской Федерации: утв. Постановлением Правительства РФ от 12.02.1999 № 167. М., 1999 г.

<sup>2</sup> МДК 3-02.2021. Правила технической эксплуатации систем и сооружений коммунального водоснабжения и канализации: утв. приказом Госстроя РФ от 30.12.1999 № 168. М.: Информиздат, 2021.



**Рис. 1.** Колебание уровня наполнения в трубах самотечных сетей водоотведения:  $H_1$  — уровень нормативного наполнения, согласно требованиям СП 32.13330.2012;  $H_φ$  — уровень фактического наполнения, обусловленный наличием слоя осадка  $h$  в лотковой части труб;  $h$  — толщина слоя осадка;  $d_{вн}$  — внутренний диаметр трубы;  $d_{пр}$  — приведенный диаметр;  $S_p$  — толщина стенки трубы по ГОСТ для труб из конкретного вида материалов

**Fig. 1.** Fluctuation of the filling level in the pipes of gravity drainage networks:  $H_1$  — standard filling level pursuant to Construction Regulations SP 32.13330.2012;  $H_φ$  — actual filling level due to the presence of sediment  $h$  in the pipe gully;  $h$  — sediment level thickness;  $d_{вн}$  — internal diameter of the pipe;  $d_{пр}$  — reduced diameter;  $S_p$  — pipe wall thickness pursuant to GOST (All-Russian State Standard) for pipes made of specific types of materials

Для расчета приведенного диаметра  $d_{пр}$  используется формула (6).

Вывод формулы приведен ниже:

1. Смоченный периметр новой бетонной трубы:

$$\omega_H = \frac{\pi d_{вн}^2}{4}, \text{ м}^2, \quad (1)$$

где  $d_{вн} = d_H - 2S_p$ , м;  $S_p$  — толщина стенки трубы по ГОСТ, м.

2. Фактическая площадь смоченного периметра трубы со слоем отложений в лотковой части:

$$\omega_\phi = \frac{\pi (d_{вн}^\phi)^2}{4}, \text{ м}^2, \quad (2)$$

$$d_{вн}^\phi = d_{вн} - h, \text{ м}. \quad (3)$$

3. Приведенная площадь смоченного периметра трубы со слоем отложений  $h$ :

$$\omega_{пр} = \omega_H - \omega_\phi, \text{ м}^2, \quad (4)$$

$$\frac{\pi d_{пр}^2}{4} = \frac{\pi d_{вн}^2}{4} - \frac{\pi (d_{вн}^\phi)^2}{4}, \text{ м}^2, \quad (5)$$

где  $d_{вн}^\phi$  — фактический (приведенный) внутренний диаметр трубы со слоем отложений. Характеризуется приведенным диаметром  $d_{пр}$ .

4. Приведенный диаметр:

$$d_{пр} = \sqrt{d_{вн}^2 - (d_{вн}^\phi)^2} = \sqrt{d_{вн}^2 - (d_{вн} - h)^2}. \quad (6)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Условия задачи

По трубопроводу из бетонных труб диаметром  $d_{вн} = 400$  мм (0,4 м) при заданном уклоне перемещается самотечный поток сточной жидкости с расходом  $q = 150$  л/с (0,15 м<sup>3</sup>/с). Толщина слоя осадка в лотковой части труб изменяется в диапазоне значений  $h = 50$ –150 мм (0,05–0,15 м).

Требуется определить уровень фактического наполнения  $H_φ$  в трубах для условий задачи. Построить график зависимости  $H_φ = f(h)$  и обосновать необходимость проведения гидродинамической очистки сети из бетонных труб диаметром  $d_{вн} = 400$  мм с толщиной слоя отложений в его лотковой части  $h = 50$ –150 мм (0,05–0,15 м).

### Решение

В табл. 1 приведены значения гидравлических характеристик бетонных труб, рассчитанные по следующим формулам:

$$d_{вн} = d_H - 2S_p, \text{ м}, \quad (7)$$

где  $d_H$  — наружный диаметр труб по ГОСТ, м;  $S_p$  — толщина стенки бетонных труб диаметром 400 мм, м;

$$d_{пр} = \sqrt{d_{вн}^2 - (d_{вн}^\phi)^2} = \sqrt{d_{вн}^2 - (d_{вн} - h)^2}, \text{ м}^2; \quad (8)$$

$d_{пр}$  — приведенный диаметр труб, м;  $h$  — толщина слоя осадка в лотковой части труб, м;  $V_{пр}$  — приведенная скорость, м/с;

$$V_{пр} = \frac{4q}{\pi (d_{пр})^2}; \quad (9)$$

$q$  — заданный расход, м<sup>3</sup>/с;  $i_{пр}$  — приведенный гидравлический уклон, м/м;

$$i_{пр} = \frac{4V_{пр}^2}{C^2 d_{пр}}; \quad (10)$$

$C$  — коэффициент А. Шези, определяемый по формуле [6]:

$$C = \frac{R_{пр}^\gamma}{n}; \quad (11)$$

$R_{пр}$  — приведенный радиус труб, м;

$$R_{пр} = \frac{d_{пр}}{4}; \quad (12)$$

Табл. 1. Гидравлические характеристики труб

Table 1. Pipe hydraulic characteristics

Величины фактического наполнения труб при разной толщине слоя отложений $h$ , $H_\phi/h$ Values of the actual filling of pipes for different thicknesses of sediment layer $h$ , $H_f/h$	Значения характеристик гидравлического потенциала бетонных труб с отложениями в лотковой части Characteristic values of the hydraulic potential of concrete pipes having deposits in the gully			
	$d_{np}$ , м $d_{red}$ , м	$V_{np}$ , м/с $V_{red}$ , м/с	$C_{np}$ $C_{red}$	$i_{np}$ , м/м $i_{red}$ , м/м
0,280/0,00	0,400	1,19	74,55	0,00637
0,206/0,05	0,206	4,50	72,60	0,07460
0,174/0,07	0,174	6,32	72,36	0,15343
0,135/0,10	0,135	10,48	72,01	0,62757
0,114/0,12	0,114	14,63	71,77	1,88879
0,088/0,15	0,088	24,69	71,41	5,43372

$y$  — показатель степени, уточненный акад. Н.Н. Павловским, определяемый при практических расчетах по формуле:

$$y = 1,5n, \quad (12)$$

где  $n$  — коэффициент шероховатости стенок труб.

Для расчетов принимают [8]:  $n = 0,012–0,014$ .

### ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ расчетных значений приведенного уклона бетонных труб  $i_{np}$  при разной толщине слоя осадка  $h$  в их лотковой части показывает, что последний изменяется в диапазоне значений  $h = 0,05–0,015$  м, т.е. на 99,88 % или в 2 раза, что свидетельствует о существовании зависимости фактического уровня наполнения труб  $H_\phi$  от толщины слоя осадка в их лотковой части [10, 11].

По данным табл. 1 и 2 на рис. 2 построен график зависимости  $H_\phi = f(h)$ , подтверждающий сделанный вывод.

Как отмечено ранее, значение уровня фактического наполнения труб  $H_\phi$  зависит от толщины слоя осадка в их лотковой части  $h$ . Регламентированная (установленная) степень наполнения труб  $H/d_{вн}$  для приведенного примера  $H/d_{вн} = 0,7$ . То есть степень фактического наполнения труб  $H_\phi/d_{np}$  также зависит от толщины слоя отложений  $h$  в лотковой части. Это означает, что существует зависимость:

$$H_\phi/d_{np} = f(H/d_{вн}, h). \quad (13)$$

На практике при разной толщине слоя осадка принимают значение  $H/d_{вн}$ , увеличивают на 10 % (экспертная величина специалистов-практиков, эксплуатирующих сети водоотведения):

$$H_\phi/d_{np} = H/d_{вн} + 10\%. \quad (14)$$

На рис. 3 показан график зависимости  $i_{np} = f(h)$ , подтверждающий также, что, чем больше значение  $h$ , тем больше величина значения приведенного уклона  $i_{np}$  и тем меньше зазор между сводом трубы и поверхностью сточной жидкости, обеспечивающий удаление дурнопахнущих газов, выделяемых из сточной жидкости в процессе ее транспортирования по трубопроводу [12–15].

Кроме того, чем больше значение фактической степени наполнения труб  $H_\phi/d_{np}$ , тем больше значение их фактического наполнения  $H_\phi$ . Следовательно, изменяется и фактический уровень сточной жидкости в лотковой части труб. Вода накапливается также на днище бетонного колодца [16, 17]. Таким образом, исключается возможность визуального контроля состояния внутренней (лотковой) части смотровых колодцев, установленных на сети водо-

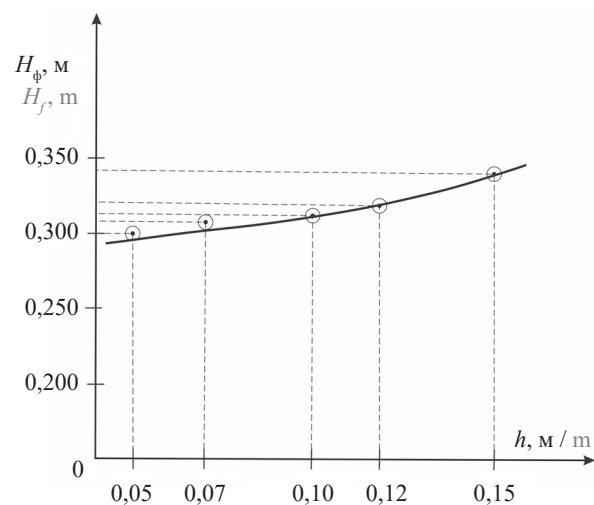


Рис. 2. График зависимости  $H_\phi = f(h)$

Fig. 2. Dependence graph  $H_f = f(h)$

Табл. 2. Изменения уровня и степени фактического наполнения труб

Table 2. Changes in the level and extent of the actual filling of pipes

Толщина слоя отложений в лотковой части труб $h$ , м The thickness of the layer of deposits in the gully of pipes $h$ , m	Приведенный диаметр труб $d_{пр}$ , м Reduced pipe diameter $d_{red}$ , m	Уровень фактического наполнения труб $H_{ф}$ , м The level of the actual filling of pipes $H_f$ , m	Степень фактического наполнения труб $H_{ф}/d_{пр}$ The degree of the actual filling of pipes $H_{act}/d_{red}$
0	0,400	0,280	0,70
0,05	0,206	0,300	0,75
0,07	0,174	0,308	0,77
0,10	0,135	0,320	0,80
0,12	0,114	0,328	0,82
0,15	0,088	0,340	0,85

Табл. 3. Значения  $H/d_{пр}$

Table 3. Values of  $H/d_{red}$

Внутренний диаметр труб по ГОСТ 20054-2016 $d_{вн}$ , мм The internal diameter of pipes according to GOST 20054-2016 $d_{in}$ , mm	Толщина стенки трубы $S_p$ , мм Pipe wall thickness $S_p$ , mm	Толщина слоя осадка $h$ , мм Sediment layer thickness $h$ , mm	Фактическое наполнение в трубах $H_{ф}$ , мм* Actual pipe filling $H_f$ , mm*	Приведенные (фактические) скорости $V_{пр}$ при фактической степени наполнения труб $H/d_{пр}$ ⊙ Reduced (actual) velocities $V_{red}$ for the actual degree of the pipe filling $H/d_{red}$ ⊙			
				0,6/0,66	0,7/0,77	0,75/0,83	0,8/0,88
300	40	100	180	2,12/3,95	----	----	----
400	55	100	280	----	1,99/2,72	----	----
500	65	100	375	----	----	0,76/2,12	----
600	75	100	450	----	----	0,53/1,74	----
800	85	100	640	----	----		0,30/1,27

Примечание: \*Расчетные формулы:  $H_{ф} = H + 10 \% = H/d_{вн} + 10 \%$ ; ⊙ $d_{пр}$  — по формуле (1);  $V_{пр}$  — по формуле (2).

Note: \*Calculation formulas:  $H_f = H + 10 \% = H/d_{in} + 10 \%$ ; ⊙ $d_{red}$  — by formula (1);  $V_{red}$  — by formula (2).

отведения. Также экспертно установлено, что предельное значение степени накопления труб  $H_{ф}/d_{пр}$  не может превышать 10 % от величины нормативного значения  $H/d_{вн}$ , т.е. для приведенного примера:

$$H/d_{вн} = 0,7 + 10 \% = 0,77,$$

что по данным табл. 2 соответствует значению толщины слоя отложений в лотковой части труб  $h = 0,07$  м (70 мм). Это означает, что при  $h \geq 0,07$  м

необходимость проведения гидродинамической очистки самотечных сетей водоотведения диаметром 400 мм всегда обоснована. В табл. 3 представлены значения  $H/d_{пр}$ , рассчитанные по формуле (7) при  $h = 0,1$  м, согласно требованиям СП 32.13330.2012 [18].

Приведенные фактические скорости движения  $V_{пр}$  в бетонных трубах разных диаметров и степенью их наполнения  $H/d_{пр}$ , при толщине слоя отложений  $h = 100$  мм.

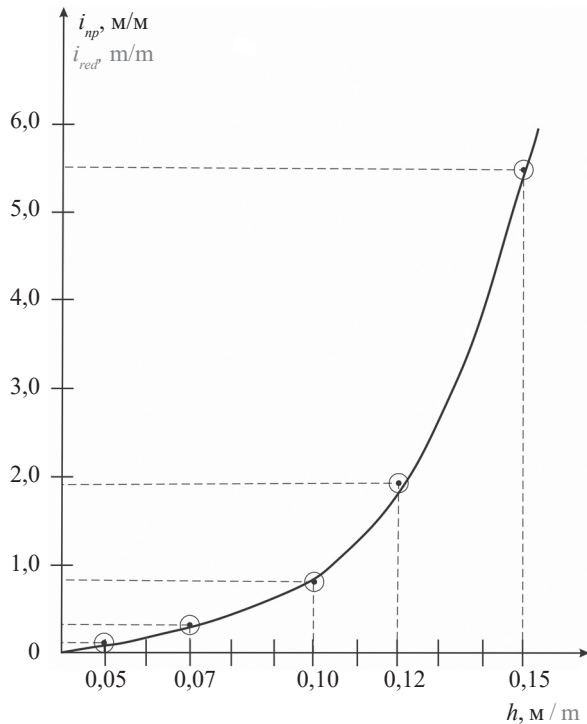


Рис. 3. График зависимости  $i_{np} = f(h)$

Fig. 3. Dependence graph  $i_{red} = f(h)$

Прогнозирование возможности продолжения эксплуатации сетей с отложениями в лотковой части труб описано в работе [19].

Проведение гидродинамической очистки самотечных сетей водоотведения производится высоконапорными струями, вытекающими под давлением насоса из специальных насадок<sup>3</sup> [20, 21].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью обоснования необходимости проведения гидродинамической очистки самотечных сетей водоотведения всегда необходимо учитывать значения:

- фактической (измеренной) толщины слоя отложений в лотковой части труб  $h$ ;
- фактического (измеренного) уровня пополнения труб  $H_{\phi}$  в сети водоотведения.

Для измерения значений указанных параметров авторами разработаны и запатентованы специальные устройства [22, 23].

<sup>3</sup> Рекомендации по гидродинамической очистке и телевизионной диагностике сетей водоотведения. СПб. : НИИ АКХ им. К.Д. Памфилова, 2001. 36 с.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федоров Н.Ф., Волков Л.Е. Гидравлический расчет канализационных сетей. Л. : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1968. 252 с.
2. Орлов В.А., Зоткин С.П. Моделирование параметров водно-воздушного режима работы самотечных канализационных сетей в условиях их реконструкции // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2020. № 3 (33). С. 5–9. DOI: 10.35108/isvp20203(33)5-9
3. Фоминых А.В., Тельминов А.В., Ковшова Н.А. Зависимость коэффициента потерь на трение по длине трубы в гидравлических системах АПК // Вестник Курганской ГСХА. 2018. № 3 (27). С. 79–82.
4. Саитов В.Е., Котюков А.Б. Исследования распределения расхода жидкости по высоте загрузки в фильтре для очистки воды с центральной перфорированной трубой // Вестник Ульяновской ГСХА. 2017. № 2 (38). С. 192–196.
5. Продоус О.А. Методика оценки продолжительности использования металлических трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2021. № 1 (157). С. 4–10.
6. Терехов Л.Д., Майны Ш.Б. Исследование изменения теплового режима канализационных сетей в зимний период // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 12. С. 42–47. DOI: 10.35776/MNP.2019.12.07
7. Бляшко Я.И. Использование канализационных стоков водоканалов, напорно-самотечных водоводов и сбросов ТЭЦ для выработки электрической энергии // Главный энергетик. 2020. № 6. С. 35–44.
8. Продоус О.А., Шлычков Д.И. Прогнозирование возможности продолжения эксплуатации самотечных сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 4 (39). С. 646–653. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-4-646-653
9. Патент РФ на полезную модель № 207822. Устройство для измерения толщины отложений в трубе / Продоус О.А., Шлычков Д.И. Зарег. в Госреестре полезных моделей РФ 18.11.2021. Срок действия до 23.07.2031.
10. Продоус О.А., Шлычков Д.И. Уточненная формула А. Шези для гидравлического расчета самотечных сетей водоотведения с отложениями в лотковой части труб // Интеллектуальный марафон в области водоснабжения и водоотведения: сб. докл. участников интеллектуального марафона в области водоснабжения и водоотведения среди молодых ученых, аспирантов и студентов. 2021. С. 56–60.
11. Воинцева И.И., Нижник Т.Ю., Стрикаленко Т.В., Баранова А.И. Антикоррозионные свойства обеззараживающих реагентов на основе полигексаметиленгуанидина гидрохлорида // Вода: химия и экология. 2018. № 10–12 (117). С. 99–108.

12. Твардовская Е.А., Терехов Л.Д. Определение оптимальной степени обледенения трубопровода, обеспечивающей увеличение пропускной способности // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы: сб. тр. LXXXI Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 2021. С. 353–357.

13. Schwermer C.U., Uhl W. Calculating expected effects of treatment effectivity and river flow rates on the contribution of WWTP effluent to the ARG load of a receiving river // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 288. Pp. 2–14. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112445

14. Орлов В.А. Энергосбережение как результат реконструкции водопроводных сетей бестраншейными методами // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования: сб. докл. Первой Национальной конф. 2020. С. 866–870.

15. Чупин Р.В. Оптимизация развивающихся систем водоотведения: монография. Иркутск : Издательство ИрГТУ, 2015. 417 с.

16. Shlychkov D. Energy-saving as an integral part of technical and economic efficiency // Opcion. 2019. Vol. 35. № Special Edition 24. Pp. 1626–1636.

17. Ручкинова О.И., Дьяков П.П., Россихин В.Ю. Оценка естественной тяги в коллекторе водоотводящей сети // Construction and Geotechnics. 2020. Т. 11. № 2. С. 78–87. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.07

18. Иваненко И.И., Сеничева К.С. Изучение режима поступления городских сточных вод малых населенных пунктов в сухую погоду // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 2. С. 225–236. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.225-236

19. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: справочное пособие. М. : Издательский дом «Бастет», 2014. 382 с.

20. Воинова И.И., Новиков М.Г., Продоус О.А. Продление периода эксплуатации трубопроводов систем водоснабжения из стальных и чугунных труб // Инженерные системы. АВОК – Северо-Запад. 2019. № 1. С. 44–47.

21. Князев Д.К. Техническое перевооружение предприятия как инструмент управления экологическими рисками промышленного города // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 12 (111). С. 1399–1407. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.12.1399-1407

22. Klyuev S.V., Shlychkov D.I., Muravyov K.A., Ksenofontova T.K. Optimal design of building structures // International Journal of Advanced Science and Technology. 2020. Vol. 29. Issue 5. Pp. 2577–2583.

23. Паливец М.С. К вопросу экспериментального определения гидравлического коэффициента трения в напорных водоводах квадратного сечения // Природообустройство. 2016. № 4. С. 20–26.

Поступила в редакцию 11 января 2021 г.

Принята в доработанном виде 31 января 2022 г.

Одобрена для публикации 31 января 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: **Олег Александрович Продоус** — доктор технических наук, профессор, генеральный директор; **ИНКО-ЭКСПЕРТ**; 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 37/1, лит. А, пом. 1-Н; РИНЦ ID: 837891; pro@enco.su;

**Дмитрий Иванович Шлычков** — кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 536457; SHlyichkovDI@mgsu.ru;

**Иванна Александровна Абросимова** — аспирант, преподаватель кафедры автоматизации и электроснабжения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1066562; AbrosimovaIA@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Продоус О.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии.

Шлычков Д.И. — участие в разработке учебных программ и их реализации, развитие методологии, итоговые выводы, научное редактирование.

Абросимова И.А. — обработка материала, написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Fedorov N.F., Volkov L.E. *Hydraulic calculation of sewer networks*. Leningrad, Stroyizdat, Leningrad. department, 1968; 252. (rus.).

2. Orlov V.A., Zotkin S.P. Modeling parameters of water-air mode of gravity sewer networks opera-

tion under reconstruction. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea*. 2020; 3(33):5-9. DOI: 10.35108/isvp20203(33)5-9 (rus.).

3. Fominykh A.V., Telminov A.V., Kovshova N.A. The dependence of the coefficient of friction losses along

the length of the pipe in hydraulic systems of the agro-industrial complex. *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*. 2018; 3(27):79-82. (rus.).

4. Saitov V.E., Kotyukov A.B. Investigation of the distribution of fluid flow over the height of the load in the filter for water purification with a central perforated pipe. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2017; 2(38):192-196. (rus.).

5. Prodous O.A. Methodology for assessing the continued use of metal pipelines in water supply and drainage systems. *Water Treatment. Water Treatment. Water Supply*. 2021; 1(157):4-10. (rus.).

6. Terekhov L.D., Mainy Sh.B. Study of the changes in the thermal conditions of sewer networks in winter. *Water Supply and Sanitary Engineering*. 2019; 12:42-47. DOI: 10.35776/MNP.2019.12.07 (rus.).

7. Blyashko Ya.I. Use of sewage effluents of water utilities, pressure-gravity water conduits and discharges of a thermal electric power plant to generate electrical energy. *Chief Power Engineer*. 2020; 6:35-44. (rus.).

8. Prodous O.A., Shlychkov D.I. Forecasting continued operation of gravity drainage networks with deposits in pipe water troughs. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021; 11(4):(39):646-653. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-4-646-653 (rus.).

9. Patent RF for utility model No. 207822. *Device for measuring the thickness of deposits in a pipe* / Prodous O.A., Shlychkov D.I. Registered in the State Register of Utility Models of the Russian Federation on November 18, 2021. Valid until July 23, 2031.

10. Prodous O.A., Shlychkov D.I. Refined formula of A. Shezi for hydraulic calculation of gravity drainage networks with deposits in the chute part of the pipes. *Intellectual marathon in the field of water supply and sanitation: a collection of reports of participants in the intellectual marathon in the field of water supply and sanitation among young scientists, graduate students and students*. 2021; 56-60. (rus.).

11. Vointsev I.I., Nizhnik T.Yu., Strikalenko T.V., Baranova A.I. Anticorrosive properties of disinfectant reagents based on polyhexamethylene guanidine hydrochloride. *Water: Chemistry and Ecology*. 2018; 10-12(117):99-108. (rus.).

12. Tvardovskaya E.A., Terekhov L.D. Determination of the optimal degree of icing of the pipeline, providing an increase in throughput. *Transport: problems, ideas, prospects: collection of proceedings of the LXXXI All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists*. 2021; 353-357. (rus.).

13. Schwermer C.U., Uhl W. Calculating expected effects of treatment effectivity and river flow rates on the contribution of WWTP effluent to the ARG load of a receiving river. *Journal of Environmental Management*. 2021; 288:2-14. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112445

14. Orlov V.A. Energy saving as a result of reconstruction of water supply networks by trenchless methods. *Actual problems of the construction industry and education: collection of reports of the First National Conference*. 2020; 866-870. (rus.).

15. Chupin R.V. *Optimization of developing drainage systems: monograph*. Irkutsk, Publishing House ISTU, 2015; 418. (rus.).

16. Shlychkov D. Energy-saving as an integral part of technical and economic efficiency. *Opcion*. 2019; 35(SpecialEdition24):1626-1636.

17. Ruchkinova O.I., Diakov P.P., Rossikhin V.Y. Assessment of relative pressure in the sewage network collector. *Construction and Geotechnics*. 2020; 11(2):78-87. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.07 (rus.).

18. Ivanenko I.I., Senicheva K.S. Research of sewage intake of small settlements in dry weather. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14:2:225-236. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.225-236 (rus.).

19. Shevelev F.A., Shevelev A.F. *Tables for hydraulic calculation of water pipes. Reference manual*. Moscow, Publishing House "Bastet", 2014; 382. (rus.).

20. Vointseva I.I., Novikov M.G., Prodous O.A. Extension of the period of operation of pipelines of water supply systems made of steel and cast iron pipes. *Engineering systems. AVOK – North-West*. 2019; 1:44-47. (rus.).

21. Knyazev D.K. Modernisation of the enterprise as an instrument for control of ecological-hygienic risks of the industrial city. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12:(12):(111):1399-1407. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.12.1399-1407 (rus.).

22. Klyuev S.V., Shlychkov D.I., Muravyov K.A., Ksenofontova T.K. Optimal design of building structures. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020; 29(5):2577-2583.

23. Paliivets M.S. On the question of experimental determination of hydraulic coefficient of friction in pressure conduits of square section. *Environmental Management*. 2016; 4:20-26. (rus.).

Received January 11, 2021.

Adopted in revised form on January 31, 2021.

Approved for publication on January 31, 2021.

**BIONOTES: Oleg A. Prodous** — Doctor of Technical Sciences, Professor, General Director; **INCO-EXPERT**; pom. 1-H, lit. A, 37/1 Moskovsky Avenue; St. Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RISC: 837891; pro@enco.su;

**Dmitriy I. Shlychkov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 536457; SHlyichkovDI@mgsu.ru;

**Ivanna A. Abrosimova** — postgraduate, Lecturer of the Department of Automation and Power Supply; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1066562; AbrosimovaIA@mgsu.ru.

*Contribution of the authors:*

*Prodous O.A. — scientific leadership, research concept, methodology development.*

*Shlychkov D.I. — participation in the development of training programs and their implementation, development of methodology, final conclusions, scientific editing.*

*Abrosimova I.A. — processing the material, writing the original text.*

*The authors declare no conflict of interest.*

# ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

## СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список источников указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

**Имя Отчество Фамилия<sup>1</sup>, Имя Отчество Фамилия<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна

<sup>2</sup> Место работы второго автора; город, страна

*\*если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициал*

## АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

**Благодарности.** Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

**Ключевые слова** – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

## ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

**Основной текст научной статьи**, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

## РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

### **Образец:**

**Рис. 1.** Пример рисунка в статье

**Figure 1.** Example of article image

**Табл. 1.** Пример таблицы в статье

**Table 1.** Example of table for article

## ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин ( $A$ ,  $F$ ,  $b$  и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы ( $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

**Имя, Отчество, Фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

### СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «**Вклад авторов:**» (**Contribution of the authors:**). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

# КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

## ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

## ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

**Введение** (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

**Материалы и методы** (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

**Результаты** (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

**Заключение** (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

## КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

### **Образец:**

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

### **Образец:**

#### **Reference**

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

#### **Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:**

**Книги до трех авторов:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель\*, Год издания; Общее количество страниц.

### **Образец:**

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

**Книги более трех авторов:** Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

**Статья в печатном журнале:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том\* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

### **Образец:**

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

**Статья в электронном журнале:** Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том\* (Выпуск): Страницы. URL.

### **Образец:**

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: [http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03\\_03\\_2017.pdf](http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf) DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

**Статья, размещенная на интернет-сайте:** Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)\*. Название [Internet]. Город, Издатель\*, Год издания [Дата последнего обновления\*; дата цитирования]. URL

**Образец:** *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

\* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс [Citethisforme.com](http://Citethisforme.com).

## ШАБЛОН СТАТЬИ

### Тип Статьи

Тип статьи - научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т. п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI 11111

## ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

### Имя Отчество Фамилия<sup>1</sup>, Имя Отчество Фамилия<sup>2</sup>...

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна

<sup>2</sup> Место работы первого автора; город, страна

\*если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы

**Аннотация** (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

**Введение:** приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

**Материалы и методы:** описание применяемых информационных материалов и научных методов.

**Результаты:** развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

**Выводы:** аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотации.**

**Ключевые слова:** 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

*Благодарности* (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

*Автор, ответственный за переписку:* Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

## ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

### И.О. Фамилия<sup>1</sup>, И.О. Фамилия<sup>2</sup>... на английском языке

<sup>1</sup> Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

<sup>2</sup> Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

\*если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы

**Abstract** (200–250 слов)

**Introduction:** text, text, text.

**Materials and methods:** text, text, text.

**Results:** text, text, text.

**Conclusions:** text, text, text.

**Key words:** text, text, text.

*Acknowledgements:* text, text, text.

*Corresponding author:* Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи – на английском языке

## ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

**Литературный обзор.** Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, 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 желательнее раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводятся ссылки на источники.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

### Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

### Пример оформления:

### 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.

**В и о н о т е с:** **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

**Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

**ВНИМАНИЕ!** Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

*Вклад авторов:*

*Фамилия И.О. - описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).*

**Пример:**

*Артемяева С. С. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В. В. – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.*

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

**Пример:**

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

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов*



УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 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

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

(наименование банка получателя платежа)

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 2022 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика \_\_\_\_\_

Адрес

плательщика \_\_\_\_\_

Сумма

платы

за

Сумма платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп.

Итого \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп. « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика \_\_\_\_\_

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

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

(наименование банка получателя платежа)

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 2022 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика \_\_\_\_\_

Адрес

плательщика \_\_\_\_\_

Сумма

платы

за

Сумма платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп.

Итого \_\_\_\_\_ руб. \_\_\_\_\_ коп. « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика \_\_\_\_\_

Квитанция

Кассир

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. 14-23), [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/>

