

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 15 Выпуск 3/2020
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 15. Выпуск 3
2020**

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

Сквозной номер 138

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 15. Issue 3
2020**

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 публикация, распространение результатов российских и зарубежных научных исследований для обеспечения широкого обмена научной информацией, формирования открытого информационного кластера в области строительной науки и образования, повышения международного авторитета российской строительной науки.

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26, корп. 8. Тел.: (495) 287-49-14, вн. 13-71, (499) 188-29-75. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: ric@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru
Тел.:	(499) 188-29-75
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	24.03.2020.
Подписан в свет	31.03.2020.

Формат 60×84/8. Усл.-печ. л. 17,55. Тираж 100 экз. Заказ № 55

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, президент, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Заместители главного редактора

Евгений Валерьевич Королев, д-р техн. наук, проф., временно исполняющий обязанности ректора, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Редакционная коллегия

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

Александр Тевьетевич Беккер, чл.-корр. Российская академия 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

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

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

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

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

Дмитрий Николаевич Силка, д-р экон. наук, доц., зав. каф. экономики и управления в строительстве, 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

Зав. редакцией

Анна Александровна Дядичева

Редакторы

Татьяна Владимировна Бердникова,

Эмилия Борисовна Нетунаева

Корректор

Лариса Михайловна Волкова

Дизайн и верстка

Елена Владимировна Жукова

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

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, ИПМ им. А.Ю. Ишлинского РАН, 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., проректор (дополнительное профессиональное образование), зав. каф. менеджмента и инноваций, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Андрей Анатольевич Волков, председатель, член-корр., член президиума Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., проф. каф. информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве, НИУ МГСУ, 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

Георгий Васильевич Есаулов, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р архитектуры, проф., проректор по научной работе, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский архитектурный институт (Государственная академия)» (МАРХИ), 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

Андрей Александрович Морозенко, д-р техн. наук, доц., зав. каф. строительства объектов тепловой и атомной энергетики, 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

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

Олег Григорьевич Примин, д-р техн. наук, проф., зам. директора по научным исследованиям, АО «МосводоканалНИИпроект», 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

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 ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company "ASV Publishing House", 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: ric@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	24.03.2020

Distributed by subscription

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)", 2020

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

Evgeniy V. Korolev, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Editorial Board

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 Gładyszewska-Fiedoruk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

Milan Holický, Czech Technical University in Prague, Klokner Institute, Czech Republic

Rolf Katzenbach, Doctor of Engineering, Professor, 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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

Roode Liias, PhD, Professor (construction economics and management) Tallin University of Technology, Estonia

Dmitry N. Silka, 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

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

Managing editor

Anna A. Dyadicheva

Editors

Tat'yana V. Berdnikova,

Emiliya B. Netunaeva

Corrector

Larisa M. Volkova

Layout

Elena V. Zhukova

Russian-English translation

Ol'ga V. Yudenkova

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

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

Georgi V. Esaulov, Moscow Institute of Architecture (State Academy), 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

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

Andrei A. Morozenko, 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

Andrey B. Ponomarev, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

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

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

Andrey A. Volkov, 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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

М.В. Князева, А.В. Коробова

Поиск своего пути: современные храмы Рязани в творчестве иерея Константина Камышанова.	330
---	------------

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

И.П. Салтыков

Расчет звукоизоляции тонких перегородок на основе модели с сосредоточенными параметрами	353
--	------------

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Ле Минь Туан, И.С. Шукуров

Моделирование тепло-ветрового режима городской улицы в г. Ханое	368
--	------------

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Н.А. Анискин, Нгуен Чонг Чык

Проблема температурного трещинообразования в бетонных гравитационных плотинах.	380
---	------------

Л.В. Волгина, И.А. Гусев

О гидравлическом сопротивлении при гидроабразивной резке	399
---	------------

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.А. Орлов, А.В. Саймуллов, О.В. Мельник

Изучение процесса появления дурно пахнущих запахов в канализационных сетях и анализ средств их удаления	409
--	------------

В.Н. Азаров, А.А. Кузьмичев, Д.А. Николенко, А.Н. Васильев, Е.Ю. Козловцева

Исследование дисперсного состава пыли городской среды.	432
---	------------

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.В. Сокольников

Математическая постановка задачи моделирования поточной организации работ в строительстве	443
--	------------

Э.И. Алирзаев, М.Е. Дементьева

Выбор технологии обеспечения эксплуатационной пригодности зданий в зоне подземного строительства	452
---	------------

Требования к оформлению научной статьи.	462
--	------------

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Marina V. Knyazeva, Anastasia V. Korobova

Finding one's way: contemporary churches of Ryazan in the works of priest Konstantin Kamyshev	330
--	------------

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

Ivan P. Saltykov

Sound insulation design of the thin partitions on the base of concentrated parameters model.	353
---	------------

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Le Minh Tuan, Ilkhomzhon S. Shukurov

Computational Fluid Dynamics Analysis for thermal-wind environment simulation of urban street in Hanoi city	368
--	------------

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Nikolay A. Aniskin, Nguyen Trong Chuc

The problem of temperature cracking in concrete gravity dams	380
---	------------

L.V. Volgina, I.A. Gusev

Hydraulic resistance accompanying waterjet cutting	399
---	------------

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Vladimir A. Orlov, Alexey V. Saimullov, Olga V. Melnik

A study of the process of malodor formation in sewer networks and analysis of methods for its elimination	409
--	------------

Valeriy N. Azarov, Andrey A. Kuzmichev, Denis A. Nikolenko, Anatoliy N. Vasilev, Elena Yu. Kozlovskaya

The research of dust dispersed composition of urban environment	432
--	------------

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

Vladimir V. Sokolnikov

Mathematical formulation of the problem of modeling the flow organization of works in construction	443
---	------------

Emil Imran Oglu Alirzaev, Marina E. Dement'eva

Choice of technologies of ensuring exploitation suitability of buildings in the underground construction area	452
--	------------

Requirements for research paper design	462
---	------------

Поиск своего пути: современные храмы Рязани в творчестве иерея Константина Камышанова

М.В. Князева¹, А.В. Коробова^{1,2}

¹ Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета; г. Рязань, Россия;

² Государственная инспекция по охране объектов культурного наследия Рязанской области;
г. Рязань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель исследования — рассмотреть и выявить архитектурные особенности православных храмов, спроектированных и возведенных в г. Рязани с начала 2000-х годов. Для реализации поставленной цели необходимо выполнить ряд задач: выявить и изучить построенные храмовые сооружения; проанализировать объемно-планировочные характеристики и разделить их на типологические группы; составить краткий биографический путь автора-архитектора данных построек, так как деятельность зодчих имеет большое значение в формировании историко-архитектурного облика города. Объект исследования — современная религиозная архитектура. Предмет исследования — построенные православные храмы.

Материалы и методы. Работа выполнена на основе натурных исследований, в том числе сбора информации и фотофиксации материала. Используются теоретические методы исследования, основанные на изучении опубликованных работ зарубежных и отечественных авторов, анализе и обобщении информации, составлении таблиц, подготовке выводов и заключения.

Результаты. Проанализирована проблема современного храмового искусства. Проведен краткий анализ истории православного культового строительства в Рязани. В научном обзоре рассмотрены 12 новопостроенных православных церковных сооружений, созданных в период с 2000 по 2014 г., а также хронология. Выявлены объемно-композиционные и характерные особенности возведенных сооружений. Коротко выделены основные вехи становления творческого пути автора-архитектора, благодаря которому появились эти образцы современного культового зодчества.

Выводы. Значимость полученных результатов для архитектуры состоит в расширении научных знаний в области современной сакральной архитектуры. Анализ примеров новых храмовых объектов привел к установлению особенностей и черт, применяемых зодчими при проектировании, формирующих образ, типологическую природу современного храма и его конструктивную основу.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: современные храмы, культовая архитектура, современное церковное зодчество, традиция, новаторство, архитектор, Рязань, Россия

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Князева М.В., Коробова А.В. Поиск своего пути: современные храмы Рязани в творчестве иерея Константина Камышанова // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 3. С. 330–352. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.330-352

Finding one's way: contemporary churches of Ryazan in the works of priest Konstantin Kamyschanov

Marina V. Knyazeva¹, Anastasia V. Korobova^{1,2}

¹ Ryazan Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University; Ryazan, Russian Federation;

² State Inspectorate for the protection of cultural heritage of the Ryazan region; Ryazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The research goal is to identify and analyze the architectural features of the orthodox church buildings, designed and built in Ryazan since the early 2000ies. A number of objectives are to be accomplished to achieve this pre-set goal: one must identify and study the church buildings constructed in Ryazan, analyze the space-planning solutions and break them down into typological groups; besides, one should study the biography of their architect, as his professional track record influences the city's historical and architectural appearance. This research is focused on contemporary church architecture exemplified by orthodox church buildings.

Materials and methods. Field studies serve as the backbone of this research which encompasses fact finding and photographic recording of the source material, information analysis and generalization, tabulation, making conclusions and formulating the opinion.

Results. The co-authors have analyzed the problems of contemporary church architecture and made a brief analysis of the history of orthodox church building in Ryazan. The overview encompasses 12 orthodox church buildings constructed in 2000–2014, as well as the key facts and dates associated with their construction. The co-authors have also identified

compositional and other unique features of the new church buildings. They have outlined the milestones in the creative biography of the architect who designed these items of contemporary church architecture.

Conclusions. The research findings comprise a scholarly insight into contemporary church architecture. The analysis of new church buildings has helped to identify the features, peculiarities and architectural techniques, applied by the architect. The features, identified by the co-authors, define the appearance/typology of contemporary church buildings and their constructions.

KEYWORDS: emodern temples, religious architecture, modern Church architecture, tradition, innovation, architect, Ryazan, Russia

FOR CITATION: Knyazeva M.V., Korobova A.V. Finding one's way: contemporary churches of Ryazan in the works of priest Konstantin Kamyschanov. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(3): 330-352. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.330-352 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Почти каждому старинному рязанскому храму присущ неповторимый и запоминающийся облик. Стоит произнести: «Успенский собор, Христорождественский кафедральный собор, церковь Спаса Преображения на Яру» — и сразу вспоминается конкретный образ именно этого произведения. Однако возведены они несколько веков назад.

Русская церковная архитектура прошла достаточно длинный путь развития. История храмового зодчества в Рязани восходит к XI в. Эволюция культового строительства проходит несколько исторических витков, разделяющихся как хронологически, так и с точки зрения архитектурно-строительного процесса. Первый период — начало основания города — конец XVI в., второй период приходится на XVII столетие. Следующий этап относит нас в конец XIX в.

Чтобы яснее представить ситуацию, остановимся поподробнее на данных периодах.

Рязань является одним из древнейших городов центральной части России. Его основание относят к 1095 г. [1, с. 8]. Тогда же начали возводиться храмовые постройки. Как говорится в стихотворении известного советского поэта Владимира Маяковского: «Начинается земля, как известно, от Кремля» [2]. Рязань, несомненно, начинается с Кремля.

Территория Кремля ограничивалась постройками бывшего епископского двора (современная территория архиерейского дома в северной части кремлевского холма). Устроившись на высоком холме, на южном изгибе реки Оки, при слиянии рек Трубежа и Лыбедь, город играл роль опорного пункта. В те времена рязанская земля являлась пограничным рубежом, который первым встречал удар степных кочевников. Обрывистые берега рек с трех сторон защищали город от набегов неприятеля, с четвертой, западной стороны был насыпан высокий земляной вал с глубоким рвом на подступах, который

почти полностью сохранился и в настоящее время [3, с. 24].

За пределами города находился Борисоглебский собор [4, с. 60] (дата основания храма принята 1152 г.) [5, с. 1]. С запада располагался Троицкий монастырь¹ [6], на севере — Солотчинский, чуть в стороне на острове, в с. Борки, отделенном от города болотистой поймой, — Богоявленский монастырь, игравшие в системе укреплений Переяславля-Рязанского роль более дальних форпостов.

Выгодное географическое положение способствовало тому, что в середине XII в. город начинает расти, занимая всю территорию кремлевского вала, «превращаясь в один из культурных и торговых центров Древней Руси» [7, с. 15].

В 1198 г. образовывается самостоятельная епархия, получившая наименование Рязанская и Муромская. Епископская кафедра переносится в Борисоглебский собор, обретая статус кафедрального собора, а примыкавший к нему район стал называться Владычной слободой [7, с. 18].

Смена статуса города повлекла за собой стремительный рост и изменение его объемно-пространственной и функциональных структур. Возводятся ряд уникальных культовых сооружений, ценных в историко-культурном и архитектурно-градостроительном значении. На рубеже XII–XIII вв. с юго-западной стороны сооружается Спасский монастырь. Немного позже, в месте слияния двух рек Лыбеди и Трубежа основывается Духовской монастырь, расширивший северо-восточный выступ территории Кремля. В 1500 годах вблизи епископского двора в восточной стороне Кремлевского холма был основан Казанский Явленский женский монастырь. В обиходе назывался просто — Девиный монастырь.

¹ Точная дата создания Рязанского Свято-Троицкого монастыря не известна. Историки связывают образование монастыря с посещением Рязани преподобным Сергием Радонежским и относят к 1386 г.

Пиком каменного строительства для Переяславля стал XV век. В городе начинают строить крупные каменные здания.

Первым был возведен Успенский собор (датируется концом XIV – началом XV в.). В XVIII в. в связи с постройкой нового Успенского собора был переименован в Христорождественский собор, так он называется и сегодня. Внешний вид современного здания значительно отличается от первоначального сооружения. Однако его ширина по-прежнему равна шести саженям (12 м), а в боковых стенах и апсидах сохранилась древняя кладка XV в.

В 1520 г., войдя в состав Московского княжества, возрастает значение Переяславля-Рязанского как пограничного форпоста Московского государства. При этом усиливается мощь крепости, растут посадки, значительно увеличивается территория. Вместе с тем он становится резиденцией Рязанской епархии и получает провинциальный статус. В городе возводят культовые сооружения.

В 1522 г. строят каменные епископские палаты. В 1647 г. здание сгорело. На этом месте в 1653–1655 гг. в архиерейском дворе зодчий Ю.К. Ершов возводит здание Архиерейского дома (называемое еще Дворец Олега)². В 1520–1530 гг. сооружается Архангельский собор³ [8, 9].

За пределами Кремля была выстроена церковь Николы Долгошея (Никола-Высоковская), после 1761 г. стала называться Никольской. Это была первая в Переяславле постройка, относившаяся к такому виду храмового зодчества, как шатровые храмы. По форме напоминавшие огромные башни (столпы), в основании сооружения имели квадрат, переходящий в восьмигранный, постепенно суживающийся кверху шатер.

Второй этап отмечен интенсивным храмовым строительством. Сооружается ансамбль церковных и гражданских зданий Рязанского кремля. В 1612 г. возводится Спасо-Преображенский собор. Вслед за ним началось строительство Богоявленской церкви. Первое упоминание о церкви относится к 1626 г. Но датой постройки храма принято считать 1647 г., когда церковь была построена в камне.

В 1642 г. мастером из Соликамска Василием Харитоновым, сыном Зубова, на месте более древней деревянной церкви XV в. выстроена церковь Святого Духа. Редкий пример двухшатровых храмов. Служила соборной церковью Духовского мо-

² Возможно, это название пошло оттого, что на фронте здания был изображен князь Олег Иванович. По преданию, здесь когда-то стояли дубовые палаты князя Олега Рязанского.

³ Ввиду того что письменные источники не оставили точной даты возведения Архангельского собора, в историографии приводятся разные даты. Однако анализ многих исследований позволяет отнести строительство сооружения именно к этому периоду.

настыря, основанного в XV в. Теперь это единственное здание, сохранившееся от монастыря. Стоит церковь за кирпичной оградой епископского двора, ниже по склону кремлевского холма.

В это время возводятся церкви: Введенская (1643 г.), Благовещенская (1673 г.), Николо-Дворянская (Староямская Никольская, 1676 г.), Входо-иерусалимская (1680 г.), Воскресенская (1683 г.), Покровская (с. Храпово, 1686 г.), Борисо-Глебский собор (древняя часть, 1687 г.), Спаса на Яру (1695 г.), Ильинская (1698 г.), Благо-Симеоновская (1698 г.), Владимирская (1698 г.).

Как и во всей Руси, территория Кремля выполняла основные градообразующие функции, в середине XVII в. Кремль, как и в прежние времена, являлся центром города. В 1693–1699 гг. на его территории возводится Успенский собор [10]. Сооружен по заказу рязанского митрополита Иосифа выдающимся крепостным зодчим Яковом Бухвостовым. Храм являлся не только церковным сооружением, он имел большое градостроительное значение. Поставленный на самой высокой точке кремлевского холма, собор становился основной вертикальной доминантой объемно-планировочной структуры города.

Третий этап. Согласно архивным данным, к началу XX в. в Рязани насчитывалось 35 храмов, в том числе 13 домовых, четыре иноверческих, три собора и три монастыря [11]. Следует отметить, что для небольшой по площади в 1354 десятины (1779,9 га) территории провинциального города такое число являлось довольно большим количеством.

Согласно требованиям строительного устава, располагались храмы в центрах городских переулков, в середине пространства площади или в конце улиц. Уставом регламентировались и нормы построения. Согласно правилам устава, губернаторам надлежало стараться, чтобы для их сооружения отводились самые удобные и приличные места [12] на площадях, а не посреди обывательских строений [12, ст. 90]. В селениях, где нет возможности устроить площадь, церкви должны возводиться не менее чем в 20 саженях (42,7 м) от крестьянских и всяких других строений [12, ст. 108]. При устройстве в городах следовало наблюдать, чтобы находились они на расстоянии 20 саженей, в случае затруднения отвести это пространство по крайней мере на 10 саженей (21,3 м) от соседней межи [12, ст. 105]. Согласно тем же правилам, строить предписывалось на каменных фундаментах [12, ст. 110].

Политика государства, проводимая в 1930 гг. и направленная на ликвидацию сакральной архитектуры, привела к уничтожению большого количества памятников культового зодчества. Многие священные сооружения были разрушены или при-

способлены под административные здания, склады и даже квартиры. Развитие культового зодчества было остановлено более чем на семьдесят лет.

Актуальность темы исследования определяется тем, что сегодня церковь приобрела новое социально-культурное и духовное значение. Перемены, произошедшие в религиозном сознании людей, и переоценка роли церкви в жизни общества привели к новому периоду своего развития [13, с. 4].

Начиная с 1990 гг. на постсоветском пространстве в различных регионах России отмечен бурный рост проектирования и возведения культовых сооружений. Русская православная церковь на пожертвования и непосредственную помощь многих верующих начала восстанавливать старые и возводить новые храмы по всей России, в том числе и в Рязани. Поэтому вопросы формирования принципов современного сакрального зодчества являются очень актуальными на сегодняшний день и призывают к серьезному исследованию. По этой причине авторы предприняли попытку проанализировать архитектуру современных культовых сооружений на территории г. Рязани.

Несмотря на возобновление религиозной жизни, отмечается недостаток информации о современной культовой архитектуре. Вновь построенные церковные сооружения очень скудно представлены в научно-популярных и специальных книгах и публикациях.

Отметим, что общие вопросы современной сакральной архитектуры конца XX–XXI вв. рассматривались в трудах многих авторов. Современную сакральную историографию представляют И.П. Канаев [14], М. Кеслер [15], Н.А. Каюмова [16], Е.А. Мильченко [17].

Большое значение имеют работы Н.В. Лайтарт [18], А.Н. Волковой и М.К. Енютиной [19], С.С. Левшекова [20], Н.В. Владимиркиной [21], Н.В. Ишиновой и А.И. Рауткина [22], отражающие проблему стилей в современных храмах.

Что же такое приходской храм и какова его роль в современном мегаполисе, частично освещается в статье главного редактора альманаха современной христианской литературы «Дары» С. Чапнина [23].

Тема современной постсоветской культовой архитектуры рассматривалась Н. Боровской [24], а молодой исследователь О. Щедрина рассказывает о новых средствах и технологиях, создающих современное религиозное пространство [25].

В 2013 г. в рамках круглого стола по вопросам современного сакрального искусства и храмостроительства архитекторы, искусствоведы и представители проектных организаций рассуждали о том, как будут уживаться современность и традиция [26]. Став объектом споров, тема традиций и инноваций

была продолжена в публикациях Ю. Зайцевой [27], С.В. Борисова [28], Ю. Круzman [29], А.Г. Сухановой [30], А.Н. Белкина [31], А.С. Щенкова [32], К.С. Карпенко, А.В. Щаповой, И.В. Куликовой [33]. Последние считают, что на современном этапе нужен новый подход, который будет основываться на синтезе освоения прошлого и применения новых технологий, материалов и новой выразительности архитектурных решений.

Разговор на тему «Храм XXI века» был подхвачен в номере журнала «Проект Байкал» [34, 35].

В развитие данного вопроса Л.В. Оленич посвятила статью проблеме исторической преемственности дореволюционного периода и двух последних десятилетий, выявляя факторы, задерживающие стилистическое единство религиозного облика и снижающие развитие архитектурно-канонического сознания современных зодчих [36].

Один из вариантов решения проблемы развития современного сакрального зодчества предлагает в своей работе С.М. Агафонова, считая, что таким путем может стать аскетический минимализм [37].

Современная религиозная тема регионов России представлена работами С.А. Митасова [38], Е.В. Пономаренко [39], А.Б. Бодэ [40], Ю.И. Саратовской [41], А.В. Украинцевой [42], Н.В. Гречневой [43], С.А. Пиляк [44].

Рязанская региональная тематика современного культового зодчества представлена небольшими статьями И.Н. Протопоповой [45], Е.Н. Калачевой [46].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В ходе проведения работы использовались методы теоретического анализа, синтеза и обобщения.

Методика проведения включает:

- 1) сбор доступной информации о построенных объектах современной религиозной архитектуры;
- 2) анализ исходных материалов и литературных источников, в том числе зарубежных;
- 3) натурные обследования;
- 4) изучение объемно-пространственных и художественных решений исследуемых объектов;
- 5) теоретическое обобщение сведений, формулирование выводов и заключения.

Исследование осуществлено в форме обзора, полученные данные систематизированы и структурированы, сводные данные представлены в виде таблиц и фотофиксации материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С начала 2000 гг. в Рязани стали активно строиться не только одиноко стоящие храмы, но и целые комплексы.

Автором большинства этих сооружений является священник, иерей, архитектор и реставратор Константин Евгеньевич Камышанов. Человек, которого можно назвать одним из ведущих специалистов в области культовой архитектуры Рязани, чья творческая биография выстраивается весьма закономерно, так как, занимаясь храмовым строительством, нужны знания как богословского, так и прикладного характера, ведь «создание каждого православного храма процесс сотворчества человека Богу» [47].

Архитектор Константин Камышанов

Константин Камышанов (рис. 1) родился в 1960 г. в г. Армавире Краснодарского края. По окончании Московского института путей сообщения за успехи в учебе остался в Москве. Полученный в дальнейшем опыт работы во многих точках бывшего Советского Союза (Грузии, Казахстане), в городах Архангельске, Петербурге, позволил занять должность начальника проектного отдела Рязанской реставрационной мастерской, на которую он был назначен в 1987 г.



Рис. 1. Константин Камышанов

Fig. 1. Constantine Komyshanov

По-настоящему творческий потенциал архитектора раскрылся в проектировании храмовых сооружений. Переломным моментом в судьбе Константина Камышанова стало тесное сотрудничество с Иоанно-Богословским мужским монастырем — одной из древнейших обителей, где он проработал архитектором в течение нескольких лет. Именно с осуществления проекта реставрации после передачи комплекса монастыря Рязанской епархии начнется освоение нового творческого пространства.

В 1993 г. Константин Камышанов окончил Академию реставрации. Через два года поступил на службу в отдел главного художника Управления главного архитектора г. Рязани. В 2001 г. создает собственное архитектурное бюро. В возрасте 49 лет рукоположен в чин иерея. В настоящее время служит клириком в Спасо-Преображенском монастыре. Параллельно ведет проектную деятельность.

Достоин оценив вклад в развитие культовой архитектуры, можно отметить, что авторские разработки церковных сооружений, отличающиеся стилевым разнообразием, пришлись по душе на Украине, Сахалине, в Пензе и Чеченской Республике.

Константин Камышанов совместно с рязанской епархией разработал программу возведения 12 культовых сооружений в городе. Он лично составил Схему перспективного строительства храмов в городе Рязани, о которой докладывал на горсовете и публичных слушаниях. К настоящему моменту построено 11 храмов (рис. 2) и строится двенадцатый [48].

Проблематика современной культовой архитектуры

Религиозные сооружения во все времена несли величайшее смысловое значение, меняющееся с учетом определенной исторической парадигмы, бытующих общественных точек зрения, идеологии и взглядов на жизнь, государственного устройства, взаимоотношения власти и церкви. У сакральной архитектуры есть привилегия особенного влияния на человека, следовательно, она содержит и особые обязательства.

Для начала остановимся на самом понятии «церковь». Архиепископ Нижегородский и Арзамасский Вениамин, известный своей архипастырской деятельностью, писал, что слово «церковь» имеет два определения. Первое — общество христиан, объединенных единой верой и едиными обрядами, второе — «...храм Божий или молитвенный дом, куда верующие собираются славословить Бога и молиться Ему» [49].

Развивая эту мысль, архиепископ Сергей (Голубцов), автор труда по теории храмового искусства (1962 г.), приводит нас к выводу, что «...назначение храмов как собраний для христиан для богослужения <...> вело храмоздательство к мистическому выражению в них Церкви небесной и земной, объединенных и возглавляемых Единою Главою Господом нашим Иисусом Христом...» [50]. Он подчеркивает, что в ходе развития храмовой архитектуры отмечается целостность и постоянство в отношении главных моментов, в то же время наблюдается изменчивость форм [50].

Для формирования облика православного храма сегодняшнего дня зодчие «ищут новые средства

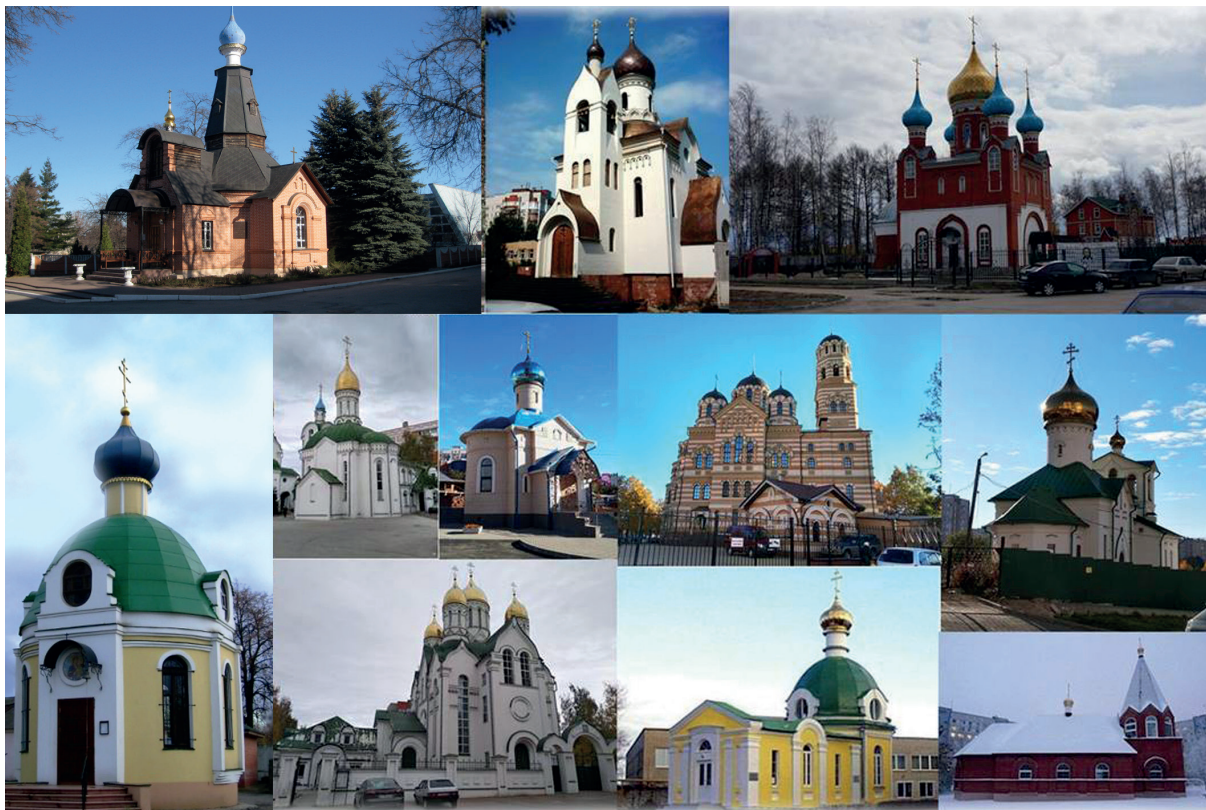


Рис. 2. Одиннадцать новых построенных храмов (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Eleven newly built temples (illustration by the authors)

архитектурного языка» [51]. Они пытаются создать архитектурный образ культового сооружения современным языком. Вместе с тем мастера обращаются к тем стиливым прототипам, которые отвечают религиозным традициям.

В последнее время все чаще стали звучать дискуссии о проектных решениях церквей-новостроек в городах, о том, по какому пути пойдет развитие культового строения. Каким будет храм XXI века?

В своих статьях архитектор М. Кеслер отмечает, что «современное состояние архитектуры православных храмов в России нельзя признать удовлетворительным, так как потеряны правильные ориентиры поиска архитектурных решений <...> и критерии оценки прошлого...» [52].

Анализ научных исследований показывает, что возможны два пути [53]. Первый — это возвращение к истокам. По этому поводу архитектор и искусствовед Д.О. Швидковский отметил, что «именно тысячелетний ход развития отечественного церковного искусства <...> передает то, что принято называть идентичностью, то есть национальным своеобразием художественной деятельности нашей Церкви <...>, которая веками была основой духовного образа Руси и России» [54, с. 6].

При этом многие архитекторы считают, что возобновление традиций культовой архитектуры

необходимо начинать со стиля модерн, вынужденно прерванного событиями 1917 г. [55, 56].

Вектор второго развития направлен на полный отказ от установленных канонов и обращение к ультрасовременным формам, характеризующимся разработкой абсолютно новых путей создания церковной архитектуры. Так, фотографии и материалы современных храмов, представленные в работах [57–61], исповедуют новые визуальные тенденции, совсем не похожие на религиозные объекты в своем традиционном понимании.

Как уже отмечалось, религиозное сознание определяет понятие «церковь» как сакральное пространство для общения человека с Богом. Современный мир изменил структуру сознания и обычных людей и архитекторов-проектировщиков. Бывшие ранее единым целым моленное формирование жизненного уклада, знание общественного христианского богослужения и архитектурно-техническая составляющая процесса храмостроения раскололись в настоящее время на отдельные формы деятельности [55].

На этот счет авторитетный немецкий теолог Фридрих Меннекес заметил, что сакральное пространство настоящего времени «...должно быть освобождено от своей кажущейся однозначности, чтобы привести его обратно в охватывающую его искренность и комплексную многозначность» [62].

Повернувшись к западному опыту, можно утверждать, что современное культовое зодчество на Западе развивается в фокусе сложности и многообразия архитектурных форм [63]. Однако в связи с распространением модернизма существует опасность утраты конфессиональной специфики.

Вместе с тем на сохранение этой специфики благоприятное влияние оказывают региональные культурные традиции, природно-климатические условия и рельеф местности [64].

Существуют мнения, что внешними формами храмы в первую очередь обязаны реагировать на окружающую градостроительную ситуацию и встраиваться в существующую застройку. В историческом центре архитектурное решение культовых построек может быть больше ориентировано на образцы минувших эпох. В современных жилых районах должно сочетать канонические традиции объемно-планировочного и пространственного решений, которые будут придавать храму индивидуальный облик.

В отношении данного вопроса архитектор Константин Камышанов говорил, что проект культового сооружения — это не просто чертеж, созданный на бу-

маге или компьютере, не сама бумага или файл, «это событие, реализуемое в нескольких пространствах. Это многослойное событие. Во-первых, это событие в головах жителей всего города. Во-вторых, это часть мозаики пространства города. В-третьих, это продолжение истории города. В-четвертых, это сама по себе архитектура. И в-пятых, это богословский концепт, привязанный к данному времени и данной земле» [65].


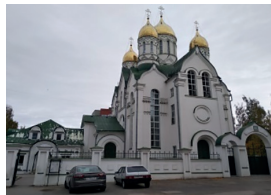

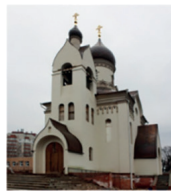
РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В поисках объемно-композиционного и стилистического решений мастер Константин Камышанов обращается к различным пластам отечественного архитектурного наследия. Его храмовые произведения разнообразны и выполнены в различных стилях: древнерусском, византийском и шатровом.

Проведя анализ, можно новопостроенные церкви и соборы разделить на пять типов: в форме креста (крестово-купольный тип), в форме круга (храм типа ротонда), храмы типа четверик, в форме корабля и смешанный тип.

Табл. 1. Объемно-планировочное решение

Table 1. Space-planning solution

Кол-во храмов / Number of churches	Название культового сооружения / Church name	Фотофиксация / Church photo
<i>Крестово-купольный тип / Cross-domed church style</i>		
4	Иоанно-Кронштадтский храм (2009–2014 гг.) ул. Татарская, д. 72 / St. John of Kronstadt Church (2009–2014) 72 Tatarskaya st.	
	Александро-Невский храм (2001–2005 гг.) ул. Новоселов, д. 33В / Alexander Nevsky Church (2001–2005) 33v Novoselov st.	
	Покрово-Татианинский храм (2000–2002 гг.) ул. Свободы, д. 46 / Church of Tatiana's Intercession (2000–2002) 46 Svobody st.	
	Храм в честь Иконы Божией Матери «Всецарица» (2010–2014 гг.) ул. Семашко, д. 3 / Church of the Icon of the Most Holy Mother of God (2010–2014) 3 Semashko st.	

Окончание табл. 1 / The end of the table 1

<i>Храм типа ротонда / Rotunda church style</i>		
1	Церковь Луки (Войно-Ясенецкого) при Рязанском военном госпитале (2002–2004 гг.) Первомайский пр-т, д. 25 / Church of Luca (Voino-Yasenetsky) of the Ryazan military hospital (2002–2004) 25 Pervomaisky Avenue	
<i>Храмы типа четверик / Quadrangle church style</i>		
2	Храм в честь святых Царственных Страстотерпцев в Дягилево (2003–2008 гг.) Московское шоссе / Church in honour of Saint Royal Passion Bearers (2003–2008) Moskovskoye Highway	
	Церковь всех Святых и Иконы Божией Матери «Достойно есть» (2000 г.) Ул. Новоселов, д. 33В / Church of All Saints and the Icon of the Mother of God “Axion Estin” (2000) 33v Novoselov st.	
<i>Храм типа корабль / Sanctuary church style</i>		
1	Ильинский храм при Рязанском авиазаводе (2008 г.) ул. Забайкальская / Ilyinsky Church of Ryazan aircraft factory (2008) Zabaikalskaya st.	
<i>Смешанный тип / Mixed church style</i>		
3	Архангельский храм при УВД (2004 г.) ул. Космонавтов, д. 13 / Archangel Church of Internal Affairs Directorate (2004) 13 Kosmonavtov st.	
	Церковь Иконы Божией Матери «Неупиваемая чаша» (2012–2013 гг.) ул. Новоселов, д. 47 / Church of the Icon of the Mother of God “Inexhaustible Chalice” (2012–2013) 47 Novoselov st.	
	Крестовоздвиженский храм (2004 г.) ул. Новоселов, д. 47 / Church of the Exaltation of the Cross (2004) 47 Novoselov st.	

Образ креста означает главу церкви Господа Иисуса и от креста получает благодать и силу. Форма круга, в котором нет ни начала, ни конца, несет символ вечности церкви [66]. Вид корабля говорит о том, что, проходя через море жизни среди соблазнов мира, «...мы можем достигнуть тихой пристани — Царствия небесного» [67]. Четверик (квадрат) символизирует землю, где народы собираются с четырех сторон света [68]. Смешанные типы вбирают в себя вышеназванные формы.

По количеству глав обозначенные церкви можно разделить на две категории: одноглавые и пятиглавые. Одноглавые храмы символизируют единство Бога, пятиглавые ставятся в честь Господа Иисуса Христа и четырех евангелистов.

К первой группе относятся восемь строений:

- 1) церковь Всех Святых и Иконы Божией Матери «Достойно есть» (2000 г., ул. Новоселов, д. 33В);
- 2) Покрово-Татианинский храм (2000–2002 гг., ул. Свободы, д. 46);
- 3) церковь Луки (Войно-Ясенецкого) при Рязанском военном госпитале (2002–2004 гг., Первомайский пр-т, д. 25);
- 4) Крестовоздвиженский храм (2004 г., ул. Новоселов, д. 47);
- 5) Ильинский храм при Рязанском авиазаводе (2008 г., ул. Забайкальская);
- 6) Архангельский храм при Управлении внутренних дел (2009–2011 гг., ул. Космонавтов, д. 13);
- 7) храм в честь Иконы Божией Матери «Всецарица» (2010–2014 гг., ул. Семашко, д. 3);
- 8) церковь Иконы Божией Матери «Неупиваемая чаша» (2012–2013 гг., ул. Новоселов, д. 47).

Вторую группу составляют три сооружения:

- 1) Александро-Невский храм (2001–2005 гг., ул. Новоселов, д. 33В);

2) храм в честь святых Царственных Страстотерпцев в Дягилево (2003–2008 гг., Московское шоссе);

3) Иоанно-Кронштадтский храм (2009–2014 гг., ул. Татарская, д. 72).

Испокон веков цвет в культовой природе архитектуры всегда играл важную роль. Цвет храма и отдельных его элементов обычно свидетельствует о его посвящении. И второй аспект — именно цветом можно выделить церковные сооружения на фоне гражданской застройки. По цветовому решению возведенные религиозные строения распределяются таким образом:

- пять храмов белого цвета — в честь Преображения или Вознесения Господня;
- три церкви красного цвета, посвящаемые мученикам;
- два храма желтого цвета — памяти святителей;
- один храм двухцветный — белый фасадный цвет стен перебит горизонтальными бежевыми полосами («полосатая» кладка).

Стилистические и композиционные особенности

Для выявления особенностей культовых сооружений рассмотрим их более детально.

Иоанно-Кронштадтский храм (рис. 3) расположен в центре градостроительного узла на пересечении нескольких микрорайонов города на одной из самых высоких его точек. Если говорить об Иоанно-Кронштадтском храме, то следует отметить, что масштабность данного сооружения позволяет выделить его в отдельную главу. Пока мы можем ограничиться лишь небольшим описанием.

Собор представляет собой большой крестово-купольный четырехэтажный объем, цокольный этаж

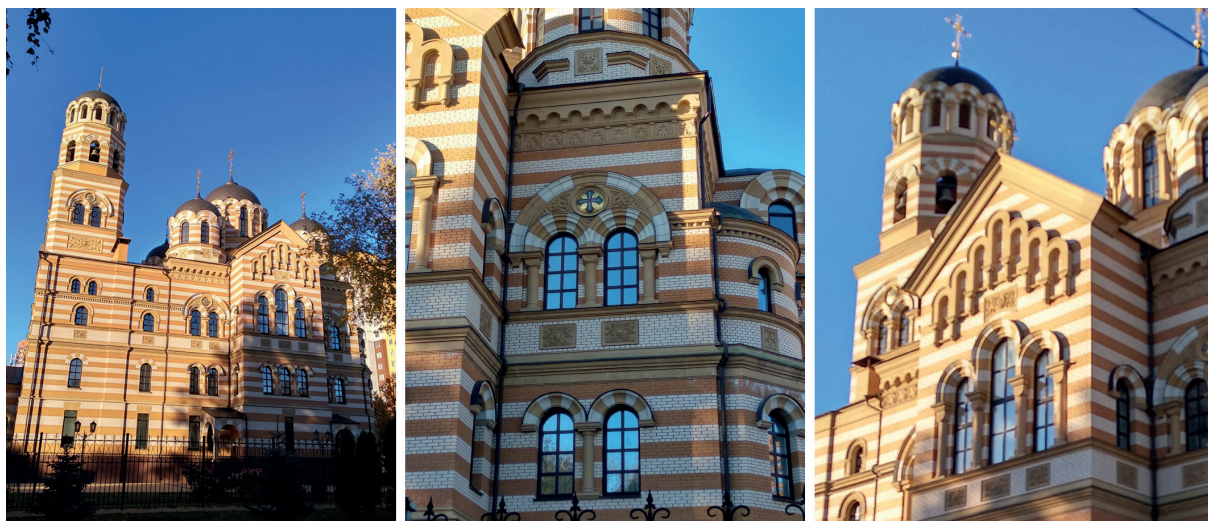


Рис. 3. Иоанно-Кронштадтский храм (иллюстрация авторов)

Fig. 3. St. John-Kronstadt temple (illustration by the authors)

которого — крестильный; два следующих этажа, где размещены духовно-просветительский центр и братские корпуса, отданы миссии; а четвертый — собственно храм. Строение в византийском стиле, с характерной для него двухцветной кирпичной кладкой, узкими полукруглыми окнами, объединенными по два или три проема общими арками. Фасады обогащены орнаментально-пластическими деталями. В надоконных нишах размещаются скульптурные изображения крестов. Колокольня совмещена с центральной осью храма. За основу взят проект Санкт-Петербургского собора Двенадцати апостолов в Иоанновском монастыре.

Здесь следует отметить, что во внутренней планировке здания выдержаны религиозные традиции сакральной архитектуры. Одновременно с этим использованы приемы новаторства: запроектированы санитарные узлы, конференц-зал, раздевалка и даже лифт, осуществляющий связь четырех этажей.

В конструктивном решении применены современные технологии. Стены и колонны представлены в монолитном исполнении. Облицовка стен выполнена из кирпича, привезенного из Украины и Ростова-на-Дону. Фундаментом служит монолитная плита толщиной в один метр [46].

Следующий храм — Александро-Невский (рис. 4). Собор отлично вписался в современную застройку одного из самых больших жилых районов Рязани. Является главной частью храмового комплекса и его доминантой, хорошо просматривается со многих видовых точек.

Имеет образ крестово-купольного белокаменного строения в русском стиле с пятью главками. Купола подобны шлемам древнерусских князей, а пять куполов — группе воинов.

Здание включает основной объем храма с тремя полуциркульными в плане апсидами и отдельно стоящей колокольней. Обращает внимание абрис шлемовидных глав, в которых прочитывается ритмический повтор рисунка трехлопастного завершения фасадов килевидными закомарами и аркатурных поясов. Вытянутые световые барабаны подчеркнуты у основания рядами кокошников. Узкие оконные проемы, прорезывающие сверху донизу боковые прясла, вытягивают архитектурную массу и облегчают плотность объема.

В качестве «фундамента» взяты схемы Успенских соборов Владимира и Звенигорода.

Покрово-Татианинский храм (рис. 5) построен по решению ученого совета Рязанского государственного университета им. Сергея Есенина, принятому в апреле 1999 г. В августе 2001 г. была завершена каменная кладка, в марте 2002 г. устроены малые кресты, в мае того же года прошло знаковое событие — освящение большого креста.

Крест в христианстве является главным символом. В христианстве все запечатляется и осеняется крестом крестной силой от всякого зла, а также для благолепия и украшения религиозных строений.

31 октября 2002 г. митрополит Рязанский и Касимовский Симон совершил освящение храма во имя Покрова Пресвятой Богородицы и Святой мученицы Татианы [69].

В отличие от рассмотренных выше объектов, данная двухпрестольная церковь отличается меньшими габаритами, формой и количеством глав. Представляет собой небольшой объем, увенчанный вытянутым шатром, в котором по четырем сторонам света прорезаны небольшие люкарны, и одной главкой. Над входом устроена небольшая звонница.

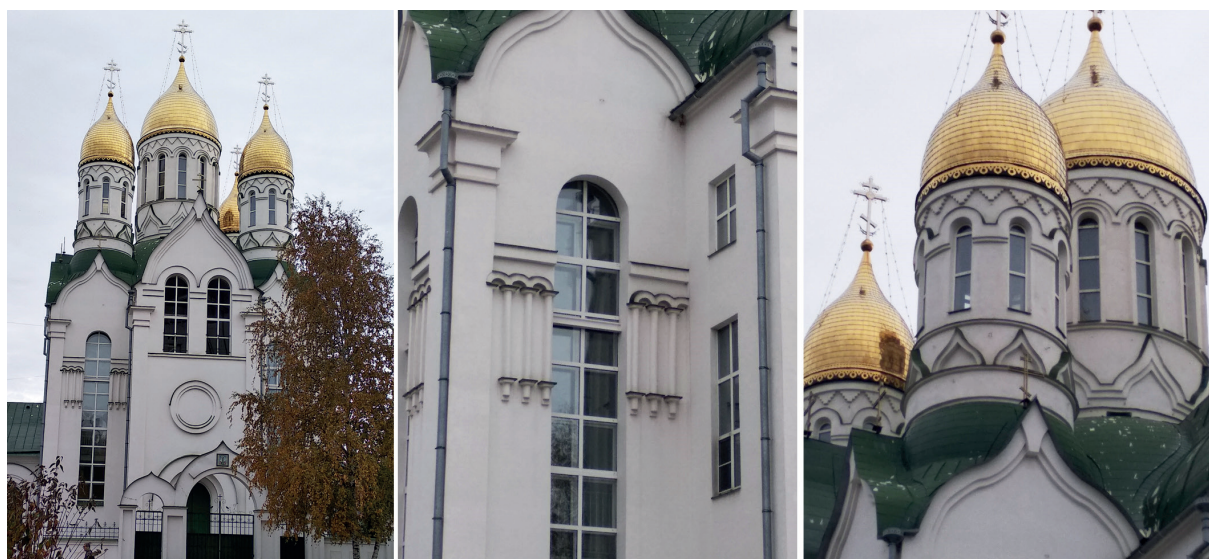


Рис. 4. Александро-Невский храм (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Alexander Nevsky temple (illustration by the authors)



Рис. 5. Покрово-Татианинский храм (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Pokrovo-Tatianinsky temple (illustration by the authors)

Храм в честь Иконы Божией Матери «Всецарица» (рис. 6) выстроен на территории больницы имени Н.А. Семашко на месте больничной часовни, которую при визите в Рязань посещал император Николай II. В далеком 1912 г. весь больничный комплекс был сооружен на пожертвования рязанского благотворителя — купца Ивана Андреевича Салтыкова. Символично, что современный храм возведен на историческом месте и тоже на благотворительные средства.

Объемно-пространственная структура здания представляет собой настолько сильно выраженную пластически законченную композицию, что ее можно сравнить со скульптурой. Здание включает основной объем храма, увенчанный низким куполом с главкой на световом барабане, полукруглую

в плане апсиду и трехъярусную колокольню. Западный, северный и южный фасады оформлены перспективными порталами с килевидным верхом. Этот же мотив прослеживается на средних линиях прясел северного и южного фасадов, выраженный в виде килевидных закомар и абриса луковичной главки. Оконные проемы — вытянутые прямоугольные, с полуциркульным завершением. Грани четверика и апсиды обработаны аркатурно-колончатыми поясами.

В звоннице располагается семь куполов, вес самого большого колокола около 2 т. На каждом из них увековечены имена благотворителей и иконы в честь их небесных покровителей.

14 августа 2017 г. прошло освящение храма митрополитом Рязанским и Михайловским Марком [70].



Рис. 6. Храм в честь Иконы Божией Матери «Всецарица» (иллюстрация авторов)

Fig. 6. Church in honor of the icon of the Mother of God “Vsetsaritsa” (illustration by the authors)

В храме работает воскресная школа для всех категорий населения, социальная служба, проходят евангельские чтения.

Церковь Луки (Войно-Ясенецкого) при Рязанском военном госпитале расположена на закрытой территории 395 рязанского военного госпиталя.

Госпитальный храм построен в память о чеченской войне. Чеченская война — одна из особых страниц в российской истории, которая, к сожалению, еще не перевернута. Политики до сих пор не могут понять, с какой целью была развязана эта война и ради чего проливалась кровь русских военнослужащих.

Рязанский гарнизонный госпиталь в периоды 1995–1996 и 2001–2002 гг. принял более 760 человек. Медицинские сотрудники делали все возможное и невозможное, чтобы спасти жизни и, можно сказать, «вытащить с того света» искалеченных солдат и офицеров. Раненные поступали прямо с поля боя.

Идея создать на территории госпиталя часовню пришла священнику отцу Луке (Аксенову), бывшему сержанту РВСИ, иеромонаху (в настоящее время — игумен) Свято-Иоанно-Богословского монастыря в 1996 г., который приходил в госпиталь со словом Божиим для духовной поддержки. Замысел стал реализовываться накануне 2000-летия Рождества Христова. Строили часовню всем миром — на пожертвования неравнодушных людей. Завершено строительство в 2002 г. В июне 2004 г. часовня была освящена в храм Луки Крымского (рис. 7) [71].

Объемно-пространственная композиция небольшой кирпичной постройки состоит из ротондонально-го объема, перекрытого куполом с главкой. Основание купола прорезано люкарнами. Наличники стройных арочных окон простые, полуциркульной формы.

Интерьер храма расписан группой иконописцев из Санкт-Петербургской академии художеств.

И в наши дни храм осуществляет свое предназначение: согревает Надеждой на выздоровление, пробуждает Любовь к людям, укрепляет Веру и призывает оберегать Отечество [71].

Святитель Лука (в миру — ученый-хирург Валентин Феликсович Войно-Ясенецкий) объединил высокую ученость и глубокую веру. Родился в Керчи. По окончании медицинского факультета Киевского университета будущий святитель занимался врачебной практикой и научной деятельностью. Одновременно участвовал в церковной жизни. В мае 1923 г. принял постриг с именем Лука. Вскоре пошли обыски, аресты, ссылки, но ничто не смогло сломить его воли и желания служить людям в качестве врача. Умер святитель Лука Крымский 11 июня 1961 г. [72]

Размещенная на въезде в город со стороны Московского шоссе *Церковь в честь святых Царственных Страстотерпцев* (рис. 8) традиционна и отсылает нас к классическому пятиглавию, характерному для местных храмов. Находится на месте сгоревшей деревянной церкви.

Архитектура фасадов строится выразительно просто и красиво, представляет собой пятиглавый двусветный четверик из красного кирпича в русском стиле с одной полукруглой в плане апсидой, слегка вытянутой в направлении «восток — запад», прилегающей к основному объему с восточной стороны. Центральный барабан — световой, угловые — глухие. Архитектурные детали применены не сами по себе, а устроены исходя из общего замысла композиции. Заостренные формы закомар над вытянутыми линиями оконных и дверных проемов и их



Рис. 7. Церковь Луки (Войно-Ясенецкого) (иллюстрация авторов)

Fig. 7. Church Of Luke (Voino-Yasenevsky) (illustration by the authors)



Рис. 8. Храм в честь святых Царственных Страстотерпцев в п. Дяги́лево (иллюстрация авторов)

Fig. 8. Temple in honor of the Holy Royal Martyrs in p. Diaghilev (illustration by the authors)

обрамлений создают ощущение устремленности массы храма ввысь.

Согласно проекту, объем планируется увеличить — будут достраиваться боковые приделы и колокольня. Храм-новостройка уже известен случаями свершения чудес, такими как исцеление тяжелобольных и мироточением иконы.

Церковь Всех Святых и Иконы Божией Матери «Достойно есть» (рис. 9) является крестильным храмом Александро-Невского прихода, заложена 1 июля 2000 г. [73]. Имеет обиходное название Всехсвятская церковь.

Строение включает квадратный в плане основной объем храма с полуциркульной в плане апсидой, перекрытый четырехгранным сомкнутым сводом, увенчанным круглым в плане высоким световым

барабаном со шлемовидной главкой, и колокольню, пристроенную с запада, с порталом со стороны входа. Здание связано переходами с административно-хозяйственными корпусами, оштукатурено и окрашено в белый цвет.

Вытянутые арочные оконные проемы «утоплены» в прямоугольные ниши. Завершает здание широкий фриз простого профиля. Линия карниза светового барабана декорирована мотивами одинарных дентикул. Вертикаль фасада подчеркнута килевидным завершением портала, которому вторит абрис шлемовидных куполов.

Ильинский храм при Рязанском авиазаводе (рис. 10) построен на территории авиационного завода. Является духовным центром не только для работников завода, но и жителей п. Дяги́лево [74].

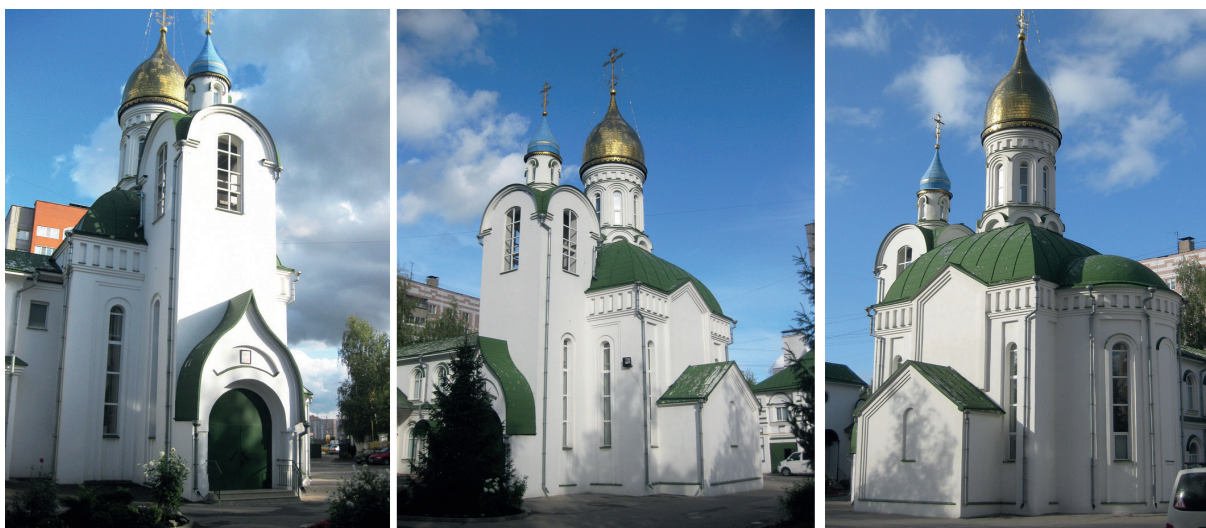


Рис. 9. Церковь Всех Святых и Иконы Божией Матери «Достойно есть» (иллюстрация авторов)

Fig. 9. Church of all Saints and icons of the Mother of God “Worthy it is” (illustration by the authors)

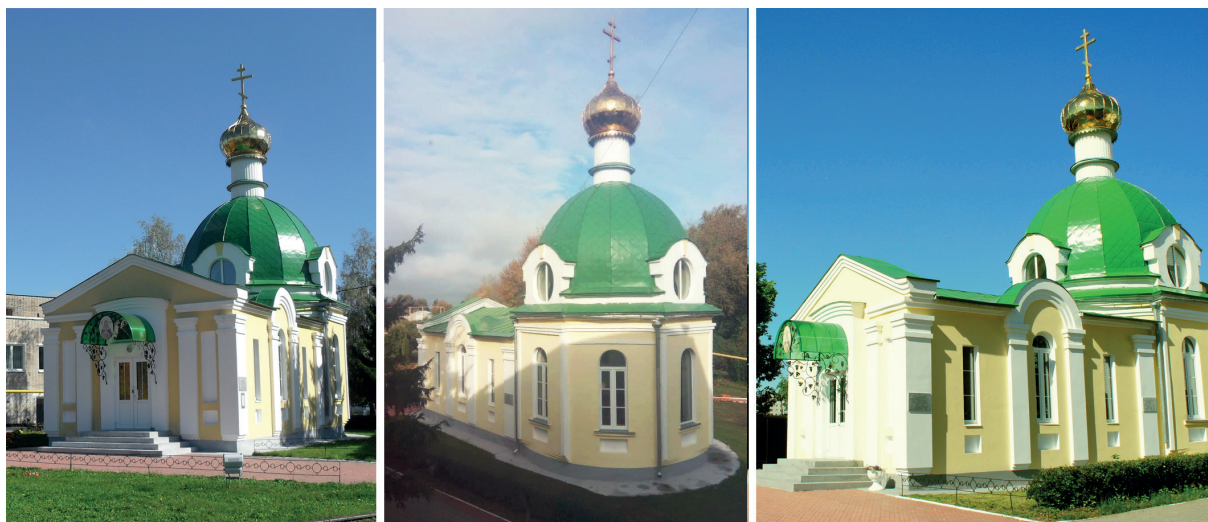


Рис. 10. Ильинский храм (иллюстрация авторов)

Fig. 10. Elijah's Church (illustration by the authors)

В мае 2003 г. был заложен первый камень часовни во имя пророка Божия Илии. Святой Илия считается покровителем всех воздухоплателей. Он был вознесен в огненной колеснице живым на небо [75]. В апреле 2004 г. состоялось освящение креста, через год — освящение часовни. В 2008 г. было принято решение о переделке часовни в храм с одноименным названием [76].

Одноэтажное здание вытянуто по оси запад — восток. Строение включает восьмиугольный в плане основной объем, увенчанный шестнадцатигранным куполом с одной главкой на глухом барабане, и прямоугольную трапезную. Основание купола прорезано по четырем сторонам света люкарнами. Углы объемов обработаны прямоугольными в плане полуколонками. Под окнами расположены горизонтально лежащие прямоугольные ниши.

Архангельский храм при УВД (рис. 11) находится на закрытой территории учебного центра Управления Министерства внутренних дел (УМВД) по Рязанской области. Построен в 2004 г. по инициативе и на средства работников УМВД в память о коллегах и товарищах, погибших при исполнении служебных обязанностей [77].

Объемно-пространственная композиция включает основной одноэтажный объем храма, прямоугольную апсиду и пристроенную с запада шатровую колокольню «восьмерик на четверике», где верхняя часть октагональной конфигурации, нижняя представляет собой кубический объем. Арочные оконные проемы декорированы профилированными наличниками такой же формы.

8 ноября 2011 г., в день памяти Дмитрия Солунского и погибших сотрудников органов внутренних дел, митрополит Рязанский и Михайловский Павел совершил чин освящения колоколов [78].

Рис. 11. Архангельский храм при УВД (фото с сайта <http://ryazeparh.ru/index.php/hram/item/15-severnoe-blagochinie-g-ryazani/29-arkhangel'skij-khram-pri-uvd>)Fig. 11. Archangel Church at the DIA (foto of site <http://ryazeparh.ru/index.php/hram/item/15-severnoe-blagochinie-g-ryazani/29-arkhangel'skij-khram-pri-uvd>)

Церковь Иконы Божией Матери «Неупиваемая чаша» (рис. 12) заложена в июне 2012 г. Является крестильной. Небольшое кирпичное строение с планом в виде тетраконха обладает уравновешенной композицией с одной массивной главой, скромной декоративной отделкой в виде килевидного обрамления портала и белых каменных наличников арочных окон. Художественная ковка козырька, кронштейны и лестничное ограждение с живописным растительным рисунком придают постройке легкость, элегантность и воздушность.

Образ Божией Матери «Неупиваемая чаша» приобрел почитание в конце XIX в. Икона пользуется особым почитанием, так как перед ней молятся об исцелении своих родных и близких от тяжкого недуга — пьянства. В наши дни эта проблема очень актуальна. Известно много случаев исцеления, по-

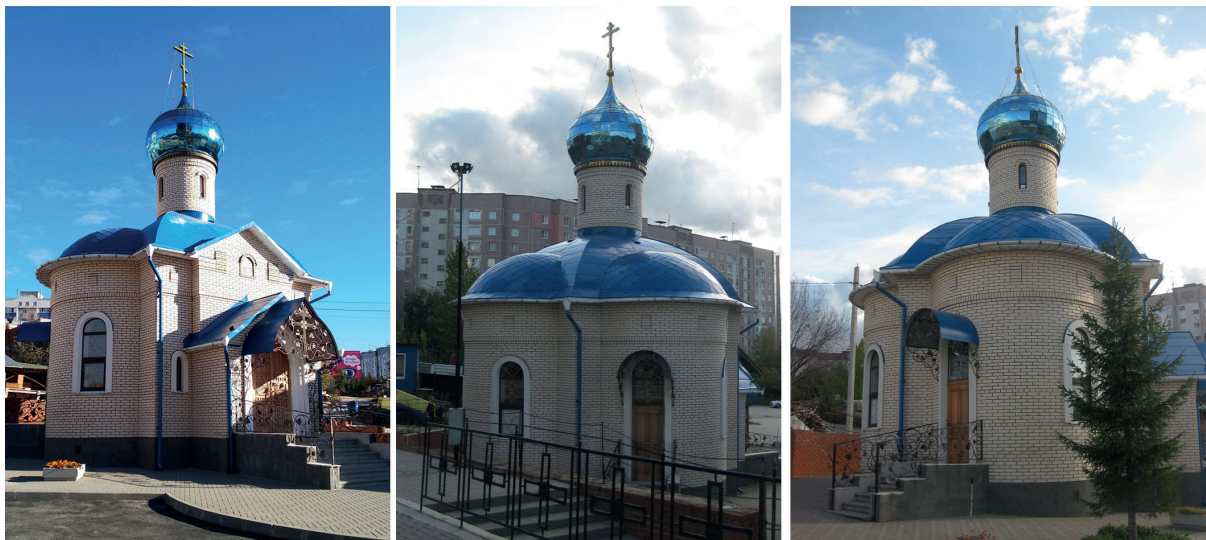


Рис. 12. Церковь Иконы Божией Матери «Неупиваемая чаша» (иллюстрация авторов)

Fig. 12. The Church of the Icon of the Mother of God “Undrinkable Cup” (illustration by the authors)

лученных от иконы «Неупиваемая чаша», как говорится в акафисте Пресвятой Богородице «Чаша, черплющая радость» [79].

Крестовоздвиженская церковь (рис. 13) построена в русском стиле, освящена в память разрушенной старой церкви, стоявшей в другом месте.

Это одноглавый четверик с живописным видом благодаря щипцовым завершениям фасадов, с трапезной, одной апсидой и прямоугольной звонницей под скатной крышей. Высокий барабан прорезан по сторонам света узкими прямоугольными, с полуциркульным завершением оконными проемами. Фасады отделаны белой штукатуркой, красиво оттенены ярко-зеленой металлической кровлей и позолотой луковичных куполов с яблоками и позолоченными крестами. Скромная декоративная отделка пред-

ставлена «каменной каймой» в виде треугольных впадин, арочного пояса по верху массивного барабана, «бровками» над вытянутыми прямоугольными окнами всех фасадов. А поток вытянутых линий килевидного портала, арочных проемов звонницы и главки создает ощущение устремленности ввысь.

Крестовоздвиженская церковь и церковь Иконы Божией Матери «Неупиваемая чаша» являются частью большого храмового комплекса, расположенного в пятом микрорайоне Дашково-Песочни, главным акцентом которого станет храм в честь Святителя Василия Рязанского (рис. 14). Он будет двенадцатым храмом архитектора-священника Константина Камышанова, строящимся в Рязани.

В основу реализуемого в настоящее время проекта заложена копия плана Спасского собора Старой

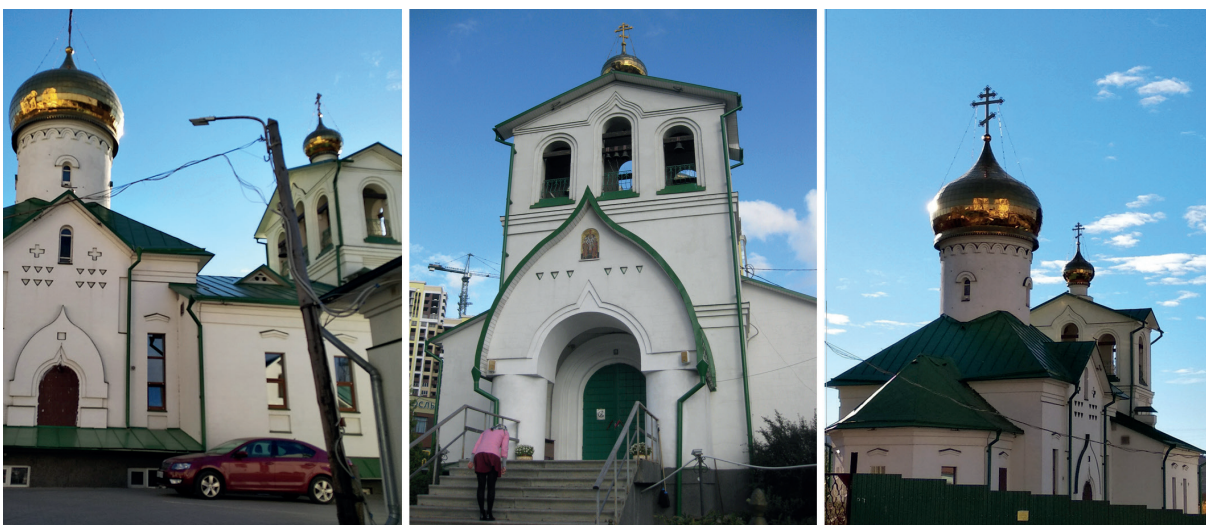


Рис. 13. Крестовоздвиженский храм, 2004 г., ул. Новоселов, д. 47 (иллюстрация авторов)

Fig. 13. Holy cross Church, 2004, Novoselov str., 47 (illustration by the authors)



Рис. 14. Храм в честь святителя Василия Рязанского (иллюстрация авторов)

Fig. 14. Church in honor of St. Basil of Ryazan (illustration by the authors)

Рязани, построенного в конце XII в. и разрушенного вместе с городом в 1237 г. в ходе татаро-монгольского нашествия.

Храм Василия Рязанского планируется довольно значительной площадью 4000 м² и вместимостью около тысячи человек. Купол строения вознесется на высоту 55 м, это выше Успенского собора Рязанского Кремля на 14 м [80].

Таким образом, на возвышенности пятого микрорайона Дашково-Песочни рождается удивительный комплекс, который станет духовно-просветительским центром и украшением города.

ВЫВОДЫ

Проведя анализ указанных церковных образцов, можно выявить их общие черты:

- переосмысление и стилизация храмовой архитектуры прошлых эпох, таких как древнерусский и византийский стиль;
- размещение храмовых комплексов в градостроительной сетке города в местах, более нуждающихся в них, — жилых районах;
- все строения создавались с учетом существующего городского пространства и окружающей среды.

Выявляются особые приемы и черты, применяемые архитектором в проектировании: устремленный вверх силуэт, использование килевидных завершений на фасадах, венчание храмов пятиглавием или одноглавием.

На основе анализа поиска новых приемов в церковном зодчестве можно прийти к выводу о том, что, несмотря на новое прочтение архитектурного облика современных храмов, в структуре каждого из них заложена каноническая символика.

При этом в архитектуре храмов есть нечто общее, так как общее лежит в самой их основе, в их сути: «Назначение храма в связи человека с Богом» [81].

Проведенное авторами исследование позволяет сделать вывод о том, что священник-архитектор Константин Камышанов внес огромный вклад в современное культовое строительство города и его архитектуру, что позволило многим микрорайонам получить иной архитектурно-пространственный облик, а верующим приобрести новые духовные центры, позволяющие еще в большей степени приобщиться к Богу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня мы можем своими глазами увидеть феномен духовного возрождения России. Начиная с 2000 г., отмечается бум возведения церковных строений. Интерес к современному образу православного храма отвечает религиозным воззрениям человечества о сакральном сооружении как о Небесном царстве. Можно предположить, что при создании храмовых объектов традиции старого зодчества будут находиться в определенном взаимодействии с новыми решениями.

При этом развитие культовой архитектуры будет всецело зависеть от таланта зодчих, а их творчество будет жить «полноценной жизнью в созвучии ее со своей народной церковной традицией» [50], сочетая «высокий профессионализм с духовными традициями древнерусского храмоздательства» [47].

Однако в каком бы стиле ни был спроектирован современный храм, его архитектура «...должна органично сочетаться с содержанием Евангелия, умело и емко воплощать в своих формах символи-

ку Божественного устройства мира, грядущего спасения человечества и Бессмертия» [82]. А решение существующих вопросов в практике современного

храмостроения может обеспечить концепция комплексного регионального подхода к современной сакральной архитектуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Даркевич В.П. Путешествие в древнюю Рязань: Записки археолога. Рязань : Новое время, 1993.
2. Маяковский В. Прочти и катая в Париж и в Китай // Информационный сайт РуСтих. URL: http://www.e-vestnik.ru/news/oblik_pravoslavnogo_hrama_i_veka_6953/
3. Иванов Д.А., Буланкин В.М. Остатки земляного оборонительного вала. Рязань. Памятники архитектуры. Объекты культурного наследия федерального значения. Научно-популярное издание / сост. Е.В. Бакушина, Е.А. Зернова, М.В. Князева. Рязань : Зерна-Слово, 2011. 164 с.
4. Потапов А.Н. Богатырский город: Историко-краеведческое повествование. Рязань : Пресса, 2007. 336 с.
5. Иеромонах Серафим (Питерский), Панкова Т.М. Борисо-Глебский кафедральный собор г. Рязани. Рязань : Зерна, 2001.
6. Свято-Троицкий мужской монастырь города Рязани // Официальный сайт монастыря. URL: <http://trinityrn.ru/letopis-obiteli>
7. Азарев А.Ф., Курьинский В.П. Рязанская история в событиях и лицах. В 4-х ч. Рязань : Русское слово, 2012. 304 с.
8. Мельник А.Г. О датировке Архангельского собора // Третьи Яхонтовские чтения : мат. науч.-практ. конф. Рязань, 12–15 октября 2004 г. Рязань : Изд-во РИАМЗ, 2005. С. 246–253.
9. Вагнер Г.К. Рязань. М. : Изд. Искусство, 1971. С. 17.
10. Исторический паспорт памятника истории и культуры «Успенский собор (1693–1699)» // Архив ГУК «Центр сохранения объектов культурного наследия».
11. Дело об улучшении освещения улиц города, 1908 // ГАРО. Ф. 19. Оп. 1. Д. 1623. Л. 41.
12. Строительный устав. Св. Зак. Т. XII, ч. 1, изд. 1900 г. (неофициальное) / под ред. / И.Д. Мордухай-Болтовского. СПб. : Русское книжное изд. «Деятель», 1912. С. 104.
13. Православные храмы. В 3-х т. Т. 2. Православные храмы и комплексы: пособие по проектированию и строительству (к СП 31-103-99). МДС 31-9.2003 / АХЦ «Арххрам». М. : ФГУП ЦПП, 2005. 222 с.
14. Канаев И.П. Каким быть современному православному храму? Информационный портал. URL: <https://www.zvonitsahram.ru/kakim-byt-sovr-prav-hramu>
15. Кеслер М. По поводу конкурса на современное архитектурное решение образа православного храма // Информационный портал.
16. Каюмова Н.А. Православное храмостроение в России в современных условиях. Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании, 2013 // Сборник научных трудов SWorld. Одесса : Куприенко, 2013. Вып. 2. Т. 39. С. 39–45.
17. Мильченко Е.А., Каюмова Н.А. Православная храмовая архитектура. Анализ состояния современной зарубежной и российской практики проектирования храмов // Новые идеи нового века : мат. Междунар. науч. конф. ФАД ТОГУ. 2014. Т. 2. С. 194–202.
18. Лайтаре Н.В. Проблема стиля в современной храмовой архитектуре России // Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена. 2008. № 77. С. 120–126.
19. Волкова А.Н., Енютина М.К. Проблема стиля в современной храмовой архитектуре России // Наука молодых — будущее России : сб. науч. ст. 2-й Междунар. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых. В 5-ти т. / отв. ред. А.А. Горохов. 2017. С. 96–98.
20. Левшеков С.С. Современные тенденции храмовой архитектуры // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2019. № 1 (40). С. 68–72. DOI: 10.25628/UNIIP.2019.40.1.012
21. Владимиркина Н.Н. Проблема стиля в современной храмовой архитектуре России // Евразийский союз ученых. 2015. № 6–5 (15). С. 160–164.
22. Ишинова Н.В., Рауткин А.И. Проблемы развития современной храмовой архитектуры России // Новые идеи нового века : мат. Междунар. науч. конф. ФАД ТОГУ. 2013. Т. 3. С. 153–159.
23. Чапнин С. Проблема пространства и времени в современной церковной архитектуре. URL: https://predanie.ru/chapnin-sergey-valerevich/problema-prostranstva-i-vremeni-v-sovremennoy-cerkovnoy-arhitekture/smotret/?utm_medium=email&utm_source=email&utm_campaign=VSH_190916
24. Боровская Н. Стоит Христова Церковь. 50 лет строительства католических храмов на (пост)советском пространстве. URL: https://predanie.ru/bovovskaya-natalya-fedorovna/stoit-hristova-cerkov/smotret/?utm_medium=email&utm_source=email&utm_campaign=VSH_190916

25. Щедрина О. Как читать современную сакральную архитектуру? Слово в отвергнутом камне. URL: https://predanie.ru/schedrina-olga/kak-chitat-sovremennuyu-sakralnuyu-arhitekturu-slovo-v-otvergnutom-kamne/smotret/?utm_medium=email&utm_source=email&utm_campaign=VSH_190916
26. Архитекторы обсуждают облик православного храма XXI века // Церковный вестник. URL: http://www.e-vestnik.ru/news/oblik_pравославного_hrama_i_veka_6953 – (дата обращения: 20.09.2019).
27. Зайцева Ю. Новая храмовая архитектура: между традицией и новаторством. URL: <http://www.blagovest-info.ru/index.php?ss=2&s=4&id=51527>
28. Борисов С.В. Традиции и новаторство в современном храмостроении // Приволжский научный вестник. 2013. № 4 (20). С. 92–97.
29. Традиции и инновации в современной храмовой архитектуре. URL: <http://www.berlogos.ru/article/tradicii-i-innovacii-v-sovremennoj-hramovoj-arhitekture> (дата обращения: 21.09.2019)
30. Суханова А.Г. Культовая архитектура — традиции и новаторство // Десятые уральские академические чтения. Интеграция образования, науки и практики. Екатеринбург, 2005. С. 176–181.
31. Белкин А.Н. История и современность в архитектуре православного храма // Научное обозрение. 2015. № 8. С. 164–168.
32. Щенков А.С. Проблемы традиционной формы в современном храмостроении России // Храмостроительство в России. Традиции и современность : тез. докл. М., 1996. С. 19–24.
33. Традиции и новаторство в архитектуре храмов XXI века // Материалы 63-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых Секция 11: Историческое наследие и современные проблемы архитектуры. URL: http://portal.tsuab.ru/ScienceWork/2017/63_UNTK_2017/0870_63_UNTK_2017.pdf (дата обращения: 20.09.2019)
34. Григорьева Е. Храмы XXI века // Проект Байкал. 2014. Т. 11. № 41. С. 1.
35. Ткачева М. Храмы XXI в. Разговор на тему номера // Проект Байкал. 2014. Т. 11. № 41. С. 40–45.
36. Оленич Л.В. Современное храмоздательство в Кузбассе: итоги, проблемы, перспективы // Вестник Кемеровского государственного университета культуры и искусства. 2010. № 11. С. 64–72.
37. Агафонова С.М. Аскетический минимализм, как один из путей развития современной храмовой архитектуры // Центральный научный вестник. 2018. Т. 3. № 9 (50). С. 50.
38. Митасов С.А. Современная культовая архитектура как репрезентант региональной идентичности православных сибиряков // Вестник КрасГАУ. 2013. № 4. С. 192–197.
39. Пономаренко Е.В. Архитектурное наследие и современная культовая архитектура южного Урала // Экомикс. 2013. № 2. С. 40–46.
40. Бодэ А.Б. Традиции в архитектуре современных деревянных церквей // Христианское зодчество. Новые материалы и исследования. М., 2004. С. 845–860.
41. Саратовская Ю.И. Размещение и композиционная роль церковных комплексов в современных градостроительных условиях: на примере Москвы и городов Московской области : дис. ... канд. арх. М., 2000. 159 с.
42. Украинцева А.В. Современные тенденции в архитектуре православных храмов Иркутска // Архитектура и дизайн. 2017. № 4. С. 13–21. DOI: 10.7256/2585-7789.2017.4.27009
43. Гречнева Н.В. Современные православные храмы города Ново-Алтайска // Мир науки, культуры, образования. 2012. № 3 (34). С. 235–238.
44. Пиляк С.А. Современные тенденции в культовой деревянной архитектуре Костромской области // Современная архитектура мира. 2016. № 6. С. 194–212.
45. Протопопова И.Н. Архитектор Валентин Третьяков // Материалы научно-практической конференции Центрального федерального округа. Рязань : РИАМЗ, 2012. С. 92–97.
46. Калачева Е.Н. Строительство храмов в современном облике города Рязани // Храм Праведного Иоанна Кронштатского: материалы научно-практической конференции Центрального федерального округа. Рязань : РИАМЗ, 2012. С. 179–181.
47. Иеромонах Гурий (Федоров). Церковный подход к храмовому строительству // Православные храмы : в 3-х т. Т. 1. Идея и образ. МДС 31-9.2003. АХЦ «Арххрам». М. : ФГУП ЦПП, 2004. С. 80–82.
48. Камышанов К.Е. Храмы России: интернет-изд. 2009. URL: <http://www.temple.ru/architect.php?ID=1179>
49. Архиепископ Нижегородский и Арзамаский Вениамин. Новая Скрижаль, или Объяснение о церкви, о литургии, и о всех службах, и утварях церковных // Православные храмы. В 3-х т. Т. 1. Идея и образ. МДС 31-9.2003. АХЦ «Арххрам». М. : ФГУП ЦПП, 2004. С. 31–35.
50. Архиепископ Сергей (Голубцов). Церковная архитектура // Православные храмы. В 3-х т. Т. 1. Идея и образ. МДС 31-9.2003. АХЦ «Арххрам». М. : ФГУП ЦПП, 2004. С. 35–37.
51. Щенков А.С. На вопрос, каким быть современному храму, пока нет ответа // Церковный вестник: интернет-изд. 2014. URL: <https://rusk.ru/st.php?Idar=65124>
52. Кеслер М.Ю. Состояние современной церковной архитектуры // Архи.ру: интернет-изд. URL: <https://archi.ru/lib/publication.html?FI=5&id=1850569921&sl=1>
53. Климкина Т.В. Опыт западноевропейской культовой архитектуры в контексте церковного зодчества современной России // Новации в области

гуманитарных наук : сб. науч. тр. по ит. Междунар. науч.-практ. конф. Рязань, 2017. С. 12–15.

54. Швидковский Д.О. Русская архитектура накануне революции. М. : Архитектура-С, 2018. 408 с.

55. Соловьев А.К., Соловьев К.А. Современная культовая архитектура и актуальные проблемы церковного искусства // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2017. № 1 (38). С. 225–242.

56. Леонтьев А. Современное храмовоздательство: опора на традицию или постмодерн // *Лента Религия*, 2 октября 2012. URL: <http://www.rondon.org/relig-121002114829>

57. Современная храмовая архитектура // Информационный портал. URL: <http://kayrosblog.ru/sovremennaya-hramovaya-arhitektura>. (дата обращения 13.09.2019).

58. Современная архитектура храмов // Информационный портал. URL: <http://bigpicture.ru/?p=417131> (дата обращения: 13.09.2019).

59. Fraska Politowska. Современная сакральная христианская архитектура и дизайн. URL: <https://katoliki.livejournal.com/627773.html>; <https://katoliki.livejournal.com/628000.html>; <https://katoliki.livejournal.com/628316.html>

60. Куканос О.С. Визуальный облик новой христианской храмовой архитектуры западных стран // *Визуальная культура: дизайн, реклама, информационные технологии* : сб. науч. ст. XVIII Всеросс. науч.-практ. конф. Омск, 2019, С. 27–31.

61. Архитектура сакрального: современный подход к религиозным строениям. URL: http://archiprofi.ru/journal/detail/arkhitektura-sakralnogo-sovremennyy-podkhod-k-religioznym-stroeniyam_b665141 (дата обращения: 13.09.2019).

62. Mennekes F. Zur Sakralität der Leere // *Kirchenbauten in der Gegenwart. Architektur zwischen Sakralität und sozialer Wirklichkeit*. Regensburg : Friedrich Pustet, 2011. Pp. 236–243.

63. Lang U.M. What Makes Architecture «Sacred»? // *Logos*. 2014. Pp. 44–64.

64. Pallister J. Contemporary religious architecture. Sacred Spaces. Contemporary Religious Architecture. London; N.Y. : Phaidon, 2015. 239 p.

65. Камышанов К. Проект храма — это не бумага и не файл. Это событие! 2017. URL: <http://www.fedmp.ru/news/proekt-hrama-eto-ne-bumaga-i-ne-fajl-eto-sobyitie-doklad-arhitektora-i-svyashhennika-konstantin-kamyshanova-postroivshego-okolo-30-hramov/>

66. Священник И. Святославский. Записки для чтения о храме. Православные храмы. В 3-х т. Т. 1. Идея и образ. МДС 31-9.2003. АХЦ «Арххрам». М. : ФГУП ЦПП, 2004. С. 49–55.

67. Священник А. Ястребов. Храм, его символика и значение в жизни христианина. Православные храмы. В 3-х т. Т. 1. Идея и образ. МДС 31-9.2003. АХЦ «Арххрам». М. : ФГУП ЦПП, 2004. С. 45–49.

68. Символизм русского православного храма. URL: <https://invirostov.livejournal.com/77431.html>. (дата обращения: 13.09.2019).

69. Покрово-Татианинский храм. URL: <http://ryazeparh.ru/index.php/hram/item/3-tsentralnoe-blagochinie/15-pokrovsko-tatianinskij-khram>. (дата обращения: 13.09.2019).

70. Освящение Храма в честь иконы Божией Матери «Всецарица» на территории больницы имени Н.А. Семашко. URL: <http://old.xn--62-6kct0akqt0e.xn--p1ai/novosti/osvasenie-hrama-v-cest-ikony-boziej-materi-vsecarica-na-territorii-bolnicy-imeni-na-semasko>. (дата обращения: 13.09.2019).

71. Храм во имя святителя Войно-Ясенецкого. URL: <http://vsrzn.cerkov.ru/istoriya/voinskij-xram-vo-imya-svyatitelya-luki-vojno-yaseneckogo/> (дата обращения: 13.09.2019).

72. Горяинова К. Небесные заступники врачей и защитники страждущих зубной болью // *Цифровая стоматология*. 2017. Т. 7. № 2. С. 85–94.

73. Александро-Невский храм города Рязани // Официальный сайт Рязанской епархии. URL: <http://ryazeparh.ru/index.php/hram/item/14-vostochnoe-blagochinie-g-ryazani/20-aleksandro-nevskij-khram-goroda-ryazani> (дата обращения: 13.09.2019).

74. На Рязанском авиазаводе был совершен чин благословения самолетов. URL: <http://ryazan.bezformata.com/listnews/ryazanskom-aviazavode-bil-sovershen/66040925/> (дата обращения: 13.09.2019).

75. Бочкова Н. Ильинские церкви на Рязанской земле. URL: <http://eparh-library.ru/eto-interesno/statio-ryazanskom-tserkovnom-kraevedenii/21-pamyat-proroka-ilii>

76. Официальный сайт Рязанской Епархии. URL: <http://ryazeparh.ru/index.php/hram/item/15-severnoe-blagochinie-g-ryazani/30-ilinskij-khram> (дата обращения: 13.09.2019).

77. День матери в Архангельском храме (УВД). URL: <http://www.metarya.ru/letopis/141-uvd/2525-den-materi-v-arkhangelskom-khrame-uvd.html> (дата обращения: 15.09.2019).

78. Освящение колоколов в Архангельском храме при УМВД России по Рязанской области. URL: <http://www.ryazan-v.ru/news/5885> (дата обращения: 15.09.2019).

79. В Рязани освятили купол и крест храма в честь иконы, спасающей от пьянства. МедиаРязань. URL: <http://mediaryazan.ru/news/detail/180341.html> (дата обращения: 15.09.2019).

80. Приход Крестовоздвиженского храма г. Рязани (Д-Песочня) Рязанской Митрополии РПЦ Московский Патриархат // Интернет-сайт храма. URL: <http://vozdvigenie.prihod.ru> (дата обращения: 13.04.2019).

81. Новиков Д. Сакральная архитектура храмов // Блог архитектора Дмитрия Новикова. URL: <http://novikov-architect.ru/sacral-arch-1.htm>

82. Мордасова О.И. Современная православная архитектура как продолжение исторических традиций православного зодчества // IV Поленовские чтения: современные проблемы сохранения и развития

художественных традиций: материалы Международной научно-практической конференции. Тамбов : Принт-Сервис, 2013. С. 205–208.

Поступила в редакцию 29 сентября 2019 г.

Принята в доработанном виде 4 февраля 2020 г.

Одобрена для публикации 27 февраля 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Марина Вячеславовна Князева** — кандидат исторических наук, заведующая кафедрой архитектуры и градостроительства; **Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета**; 390000, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, д. 26/53; РИНЦ ID: 962434; marina1859@mail.ru;

Анастасия Вячеславовна Коробова — магистрант кафедры архитектуры и градостроительства; **Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета**; 390000, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, д. 26/53; ведущий специалист отдела учета и использования объектов культурного наследия; **Государственная инспекция по охране объектов культурного наследия Рязанской области**; 390000, г. Рязань, ул. Николодворянская, д. 22; nastia240797@yandex.ru.

REFERENCES

1. Darkevich V.P. *Journey to ancient Ryazan: Notes of an archaeologist*. Ryazan, New time, 1993. (rus.).
2. Mayakovsky V. *Read and ride to Paris and in China*. Informational website Rustic. URL: <https://rustih.ru/vladimir-mayakovskij-prochti-i-kataj-v-parizhi-i-v-kitaj/> (rus.).
3. Ivanov D.A., Bulankin V.M. The Remains of the earthen defensive wall. Ryazan. Monument of architecture. Objects of cultural heritage of Federal importance. Popular science publication / comp. His E.V. Bakuchina, E.A. Zernovf, M.V. Knyazevf. Ryazan, Grain-Word, 2011; 164. (rus.).
4. Potapov A.N. *The heroic city: local history narrative*. Ryazan, Press, 2007; 336. (rus.).
5. Hieromonk Seraphim (St. Petersburg), Pan-kova T. M. *Boriso-Gleb Cathedral in Ryazan*. Ryazan, Grains, 2001. (rus.).
6. *Holy Trinity monastery in Ryazan*. Official site of the monastery. URL: <http://trinityrzn.ru/letopis-obiteli>
7. Agarev A.F., Kuryshkin V.P. *Ryazan history of events and persons*. The Book is in 4 parts. Ryazan, Russkoe Slovo, 2012; 304. (rus.).
8. Miller A.G. On the Dating of the Archangel Cathedral. *Jahontova Third reading. Materials of scientific-practical conference*. Ryazan, 12-15 October 2004. Ryazan, Publishing house RIAMS, 2005; 246-253. (rus.).
9. Wagner G.K. *Ryazan*. Ed. Art. Moscow, 1971. (rus.).
10. Historical passport of the monument of history and culture “assumption Cathedral (1693-1699)”. *Archive GUK “Center for preservation of cultural heritage”*.
11. The case of improving the lighting of city streets, 1908. GARO. F.19. In.1. C.1623. L.41.
12. *Building regulations*. SV. Zach. Vol. XII, CH. 1., ed. 1900 (unofficial). Edited by I. D. Mordukhai-Boltovsky. Saint Petersburg, Russian book publishing. “Worker”, 1912.
13. *Orthodox church. In three volumes*. Vol. 2. The Orthodox churches and complexes: a Guide to design and construction (to SP 31-103-99). MDS 31-9.2003 /ACCF “Arkham”. Moscow, FSUE BSC, 2005.
14. Kanaev I.P. *What should a modern Orthodox Church be like?* Information portal. URL: <https://www.zvonitsahram.ru/kakim-byt-sovr-prav-hramu> (rus.).
15. Kesler M. *About the competition for a modern architectural solution of the image of the Orthodox Church*. Information portal. (rus.).
16. Kayumova N.A. Orthodox Church building in Russia in modern conditions. *Modern problems and their solutions in science, transport, production and education. Collection of scientific papers SWorld*. 2013; 2(39):39-45. (rus.).
17. Milchenko E.A., Kayumov N.A. Orthodox Church architecture. Analysis of the state of modern foreign and Russian practice of designing temples. *New ideas of the new century: proceedings of the international scientific conference FAD PNU*. 2014; 2:194-202. (rus.).
18. Laitar N.V. The problem of style in modern temple architecture of Russia. *Proceedings of the Russian state pedagogical University*. A. I. Herzen. 2008; 77:120-126. (rus.).
19. Volkova A.N., Anytina M.K. The Problem of style in contemporary temple architecture of Russia. *Science to the young — the future of Russia. Collection of scientific articles of the 2nd international scientific conference of promising developments of young scientists. In 5 volumes. Executive editor A. A. Gorokhov*. 2017; 96-98. (rus.).

20. Levshakov S.S. Current trends of temple architecture. *The Academic Bulletin of the Ural State Project RAABS*. 2019; 1(40):68-72. DOI: 10.25628/UNI-IP.2019.40.1.012 (rus.).
21. Vladimirschina N.N. The problem of style in contemporary temple architecture of Russia. *Eurasian Union of scientists*. 2015; 6-5(15):160-164. (rus.).
22. Ishinova N.V., Rutkin A.I. Problems of development of modern temple architecture of Russia. *New ideas for the New century: proceedings of the international conference FAD PNU*. 2013; 3:153-159. (rus.).
23. Chapnin S. *The Problem of space and time in modern Church architecture*. URL: https://predanie.ru/chapnin-sergey-valerevich/problema-prostranstva-i-vremeni-v-sovremennoy-cerkovnoy-arhitekture/smotret/?utm_medium=email&utm_source=email&utm_campaign=VSH_190916 (rus.).
24. Borovskaya N. *Is The Church Of Christ. 50 years of construction of Catholic churches in the (post) Soviet space*. URL: https://predanie.ru/borovskaya-natalya-fedorovna/stoit-hristova-cerkov/smotret/?utm_medium=email&utm_source=email&utm_campaign=VSH_190916 (rus.).
25. Shchedrin A. *How to read a modern sacral architecture? The word in the rejected stone*. URL: https://predanie.ru/schedrina-olga/kak-chitat-sovremennuyu-sakralnuyu-arhitekturu-slovo-v-otverg-nutom-kamne/smotret/?utm_medium=email&utm_source=email&utm_campaign=VSH_190916 (rus.).
26. Architects discuss the appearance of the Orthodox Church of the XXI century. *Church Bulletin*. URL: http://www.e-vestnik.ru/news/oblik_pравославного_hrama_i_veka_6953/
27. Zaitseva Yu. *New temple architecture: between tradition and innovation*. URL: <http://www.blagovest-info.ru/index.php?ss=2&s=4&id=51527> (rus.).
28. Borisov S.V. Traditions and innovation in modern Church building. *Volga Scientific Bulletin*. 2013; 4(20):92-97. (rus.).
29. *Traditions and innovations in modern temple architecture*. URL: <http://www.berlogos.ru/article/tradicii-i-innovacii-v-sovremennoj-hramovoj-arhitekture>.
30. Sukhanova A.G. of Iconic architecture – tradition and innovation. *Tenths of the Ural academic readings. Integration of education, science and practice*. Ekaterinburg, 2005; 176-181. (rus.).
31. Belkin A.N. History and modernity in the architecture of the Orthodox Church. *Scientific Review*. Moscow, 2015; 8:164-168. (rus.).
32. Shchenkov A.S. *Problems of traditional forms in contemporary gramotron Russia. Temple construction in Russia. Tradition and modernity: tez. dokl. Moscow, 1996; 19-24. (rus.)*.
33. *Traditions and innovations in architecture of temples of the XXI century. Materials of the 63rd University scientific and technical conference of students and young scientists Section 11: Historical heritage and modern problems of architecture*. URL: http://portal.tsuab.ru/ScienceWork/2017/63_UNTK_2017/0870_63_UNTK_2017.pdf.
34. Grigorieva E. Temples of the XXI century. *Project Baikal*. 2014; 11(41):1. (rus.).
35. Tkacheva M. Temples of the XXI century discussion on the topic of the room. *Project Baikal*. 2014; 11(41):40-45. (rus.).
36. Olenich L.V. Modern Church building in Kuzbass: results, problems, prospects. *Bulletin of the Kemerovo state University of culture and art*. 2010; 11:64-72. (rus.).
37. Agafonova S.M. Ascetic minimalism as one of the ways of development of modern temple architecture. *Central scientific Bulletin*. 2018; 3(9):(50):50. (rus.).
38. Mitsov S.A. Modern religious architecture as a representant of regional identity of the Orthodox Siberian. *Herald Krasgau*. 2013; 4:192-197. (rus.).
39. Ponomarenko E.V. Architectural heritage and modern cult architecture of the southern Urals. *ECOMIX*. 2013; 2:40-46. (rus.).
40. Bode A.B. Traditions in the architecture of modern wooden churches. *Christian architecture. New materials and research*. M., 2004; 845-860. (rus.).
41. *Placement and compositional role of Church complexes in modern urban conditions: on the example of Moscow and the cities of the Moscow region: dis. cand. architectures*. M., 2000; 159.
42. Ukraintseva A.V. Modern trends in the architecture of Orthodox churches Irkutsk. *Architecture and Design*. 2017; 4:13-21. DOI: 10.7256/2585-7789.2017.4.27009. URL: http://e-notabene.ru/arch/article_27009.html (rus.).
43. Grechneva N.V. Modern Orthodox churches of Novo-Altaisk. *World of Science, Culture, Education*. 2012; 3(34):235-238. (rus.).
44. Pilyak S.A. Modern tendencies in cult wooden architecture of Kostroma region. *Modern Architecture of the World*. 2016; 6:194-212. (rus.).
45. Protopopova I.N. Architect Valentin Tretyakov. *Materials of scientific-practical conference of the Central Federal district*. RIAMZ. Ryazan, 2012; 92-97. (rus.).
46. Kalacheva E.N. Construction of churches in the modern appearance of the city of Ryazan. *Temple of the Righteous written by John of Kronstadt: materials of scientific-practical conference of the Central Federal district*. RIAMZ. Ryazan, 2012; 179-181. (rus.).
47. Hieromonk Gury (Fedorov). *Church approach to temple construction*. Orthodox churches. In three volumes. Vol. 1. Idea and image. MDS 31-9.2003. ACCF "Arkham". Moscow, Federal state unitary enterprise tspp. 2004; 80-82. (rus.).
48. Kamyshanov Konstantin Evgenievich. *The Churches of Russia*. 2009. URL: <http://www.temples.ru/architect.php?ID=1179> (rus.).
49. Archbishop Benjamin of Nizhny Novgorod and Arzamas. *The new Tablet, or Explanation of the*

Church, the Liturgy, and all the services and utensils of the Church. Orthodox churches. In three volumes. Vol. 1. Idea and image. MDS 31-9.2003. ACCF “Arkham”. Moscow, Federal state unitary enterprise tspp, 2004; 31-35. (rus.).

50. Archbishop Sergius (Golubtsov). *Church architecture*. Orthodox churches. In three volumes. Vol. 1. Idea and image. MDS 31-9.2003 /ACCF “Arkham”. Moscow, Federal state unitary enterprise tspp, 2004; 35-37. (rus.).

51. Shchenkov A.S. On the question of how to be a modern temple, there is no answer yet. *Church Bulletin*. 2014. URL: <https://rusk.ru/st.php?Idar=65124> (rus.).

52. Kesler M.Yu. *The state of modern church architecture*. URL: <https://archi.ru/lib/publication.html?Fl=5&id=1850569921&sl=1> (rus.).

53. Klimkina T.V. Experience of Western European religious architecture in the context of the church architecture of modern Russia. *Innovations in the humanities. A collection of scientific papers on the results of the international scientific-practical conference*. Ryazan, 2017; 12-15. (rus.).

54. Shvidkovsky D.O. *Russian architecture on the eve of the revolution*. Moscow, Architectura-C, 2018; 408. (rus.).

55. Soloviev A.K., Soloviev K.A. Modern religious architecture and current problems of church art. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2017; 1(38):225-242. (rus.).

56. Leontiev. A. Modern hramostroitelstva: reliance on tradition or the postmodern. *Tape Religion*. 2012. URL: <http://www.rondon.org/relig121002114829> (rus.).

57. Modern temple architecture. Information portal. URL: <http://kayrosblog.ru/sovremennaya-hramovaya-arhitektura>

58. *Modern architecture of temples*. URL: <http://bigpicture.ru/?p=417131>.

59. Fraska Politowska. *Modern sacred Christian architecture and design*. URL: <https://katoliki.livejournal.com/627773.html>; <https://katoliki.livejournal.com/628000.html>; <https://katoliki.livejournal.com/628316.html> (rus.).

60. Kukanos O.S. Visual appearance of the new Christian temple architecture of Western countries. *In the collection: Visual culture: design, advertising, information technology. Collection of scientific articles XVIII all-Russian scientific-practical conference*. Omsk, 2019; 27-31. (rus.).

61. Sacred architecture: a modern approach to religious buildings. URL: http://archiprofi.ru/journal/detail/arkhitektura-sakralnogo-sovremennyy-podkhod-k-religioznym-stroeniyam_b665141.

62. Mennekes F. Zur Sakralität der Leere. *Kirchenbauten in der Gegenwart. Architektur zwischen Sakralität und sozialer Wirklichkeit*. Regensburg, Friedrich Pustet, 2011; 236-243.

63. Lang U.M. What Makes Architecture “Sacred”? *Logos*. 2014; 44-64.

64. Pallister J. *Contemporary Religious Architecture*. Sacred Spaces. Contemporary Religious Architecture. London; N.Y., Phaidon, 2015; 239.

65. Kamyschanov K. *The temple project is not a paper or a file. This event!* 2017. URL: <http://www.fedmp.ru/news/proekt-hrama-eto-ne-bumaga-i-ne-fajl-eto-sobytie-doklad-arhitekтора-i-svyashhennika-konstantina-kamyshanova-postroivshego-okolo-30-hramov/>

66. Priest I. Svyatoslavsky. *Notes for reading about the Church*. Orthodox churches. In three volumes. Vol. 1. Idea and image. MDS 31-9.2003. ACCF “Arkham”. Moscow, Federal state unitary enterprise tspp, 2004; 49-55. (rus.).

67. Priest A. Hawks. *Church, its symbolism and significance in the life of a Christian*. Orthodox churches. In three volumes. Vol. 1. Idea and image. MDS 31-9.2003. ACCF “Arkham”. Moscow, Federal state unitary enterprise tspp, 2004; 45-49. (rus.).

68. Symbolism of the Russian Orthodox Church. URL: <https://invirostov.livejournal.com/77431.html>.

69. Pokrovo-Tatianinsky Church. URL: <http://ryazeparh.ru/index.php/hram/item/3-tsentralnoe-blagochinie/15-pokrovsko-tatianinskij-khram>.

70. Consecration of the Church in honor of the icon of the mother of God “vsetsaritsa” in the hospital named after Na Semashko. URL: <http://old.xn--62-6kct0akqt0e.xn--p1ai/novosti/osvasenie-hrama-v-cest-ikony-boziej-materi-vsecarica-na-territorii-bolnicy-imeni-na-semasko>

71. Church in the name of St. Voino-Yasenetsky. URL: <http://vsrzn.cerkov.ru/istoriya/voinskij-xram-voimya-svyatitelya-luki-vojno-yaseneckogo/>

72. Goryainova K. *Heavenly patron of doctors and advocates suffering with dental pain. Digital dentistry*. 2017; 7(2):85-94. (rus.).

73. Alexander Nevsky Church in Ryazan. Official website of the Ryazan diocese. URL: <http://ryazeparh.ru/index.php/hram/item/14-vostochnoe-blagochinie-g-ryazani/20-aleksandro-nevskij-khram-goroda-ryazani>.

74. At the Ryazan aircraft factory was made the rank of blessing the aircraft. URL: <http://ryazan.bezformata.com/listnews/ryazanskom-aviazavode-bil-sovershen/66040925/>.

75. Bochkova N. Ilyinskaya. *Church in the Ryazan region*. URL: <http://eparh-library.ru/eto-interesno/statio-ryazanskom-tserkovnom-kraevedenii/21-pamyat-proroka-ilii> (rus.).

76. Official website of the Ryazan Diocese. URL: <http://ryazeparh.ru/index.php/hram/item/15-severnoe-blagochinie-g-ryazani/30-ilinskij-khram>.

77. Mother's day in the Archangel Church (ATC). URL: <http://www.metarya.ru/letopis/141-uvd/2525-den-materi-v-arkhangel'skom-khrame-uvd.html>.

78. Consecration of bells in the Archangel Church at the Ministry of internal Affairs of Russia in the Ryazan region. URL: <http://www.ryazan-v.ru/news/5885>.

79. In Ryazan, consecrated the dome and cross of the temple in honor of the icon that saves from drunkenness. Mediarating. URL: <http://http://mediaryazan.ru/news/detail/180341.html>.

80. The parish of Holy cross Church in Ryazan (L-sand), Ryazan Metropolia of the Russian Orthodox Church of the Moscow Patriarchate. URL: <http://vozd-vigenie.prihod.ru>

81. Novikov D. *Sacred architecture of temples*. Blog of architect Dmitry Novikov. URL: <http://novikov-architect.ru/sacral-arch-1.htm> (rus.).

82. Mordasova O.I. Modern Orthodox architecture as a continuation of the historical traditions of Orthodox architecture. *IV Polensky readings : modern problems of preserving and developing artistic traditions: materials of the International Scientific and Practical Conference*. Tambov, Print-Servis, 2013; 205-208. (rus.).

Received September 29, 2019.

Adopted in a revised form on February 4, 2020.

Approved for publication February 27, 2020.

B I O N O T E S : **Marina V. Knyazeva** — Candidate of Historical Sciences; head of the Department of Architecture and urban planning; **Ryazan Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University**; 26/53 Pravo-Lybeskaya st., 390000, Ryazan, Russian Federation; ID RISC: 962434; marina1859@mail.ru;

Anastasia V. Korobova — graduate student of the Department of Architecture and urban planning; **Ryazan Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University**; 26/53 Pravo-Lybeskaya st., 390000, Ryazan, Russian Federation; leading specialist of the Department of accounting and use of cultural heritage; **State Inspectorate for the protection of cultural heritage of the Ryazan region**; 22 Nikologorskaya st., 390000, Ryazan, Russian Federation; nastia240797@yandex.ru.

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

УДК 699.844

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.353-367

Расчет звукоизоляции тонких перегородок на основе модели с сосредоточенными параметрами

И.П. Салтыков

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Теоретически и практически рассмотрен подход к расчету звукоизоляции строительных конструкций на основе метода дискретных параметров, разработанный А.В. Захаровым. Данный метод позволил разработать логически стройную и непротиворечивую физическую модель изоляции от воздушного шума как массивных, так и тонких, легких, однослойных внутренних перегородок. Исследование посвящено разработке инженерной методики расчета звукоизоляции тонких перегородок и сравнению ее результатов с результатами расчетов по действующим нормативным документам.

Материалы и методы. Дано математическое и физическое обоснование для использования выражения закона массы для нормального падения звуковых волн на пластину независимо от различных углов падения звука. Раскрыта сущность сосредоточенных параметров: сосредоточенной и приведенной масс материала или конструкции. Используются уравнения закона сохранения импульса и сохранения кинетической энергии для нахождения коэффициента прохождения колебательной скорости. Записаны формулы звукоизоляции в диапазоне частот до частоты волнового совпадения и в диапазоне выше этой частоты.

Результаты. Определено влияние демпфирующих свойств воздуха на звукоизоляцию тонких перегородок, приведены формулы для их учета. Проведен анализ формул для учета снижения звукоизоляции на резонансах в звукоизолирующей пластине или перегородке. Получена общая формула для расчета изоляции тонких перегородок по методу сосредоточенных (дискретных) параметров. Приведен пример подробного расчета звукоизоляции тонкой перегородки из асбоцементного листа. Представлено сравнение средних отклонений третьоктавных значений звукоизоляции от экспериментальных при расчете по своду правил (СП) и предложенному методу для различных материалов.

Выводы. Предложенный метод расчета звукоизоляции тонких однослойных перегородок, основанный на модели с сосредоточенными параметрами, дает очень близкие к экспериментальным результаты, что позволяет находить значения звукоизоляции во всем рассматриваемом в строительстве диапазоне частот в зависимости от изначально заданных физико-технических свойств строительных материалов и конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: закон (действия) массы, метод дискретных параметров, звукоизоляция тонких перегородок, звукоизоляция от воздушного шума, поверхностная плотность, приведенная масса, сосредоточенная масса, волновое совпадение, снижение звукоизоляции на резонансах, граничная частота

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Салтыков И.П. Расчет звукоизоляции тонких перегородок на основе модели с сосредоточенными параметрами // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 3. С. 353–367. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.353-367

Sound insulation design of the thin partitions on the base of concentrated parameters model

Ivan P. Saltykov

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

ABSTRACT

Introduction. The theoretical and practical approach on the base of the discrete parameter's method to the acoustic insulation of the thin partitions by Candidate of Science, Prof. Zakharov A.V. is given in this issue. The method allowed to develop a logically conclusive and consistent physical airborne sound insulation model for one-layered massive and light partitions either. This issue concentrates on providing of the engineer calculation technique of the sound insulation for the thin partitions and, also, on comparison of the technique's results with the computations by the current normative documents.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 15. Выпуск 3, 2020
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 15. Issue 3, 2020

Materials and methods. The application of the same "Mass Action Law's" formula both for the normal and the oblique noise wave's incidence on the sound isolating plate, regardless the sound waves angles, is mathematically and physically approved. The essence of the concentrated parameters, such as concentrated and reduced material's mass, is revealed. The equations of momentum conservation law and kinetic energy conservation are used to obtain the coefficient of the oscillation velocity transmission. The formulas for airborne sound insulation at the diapasons before and after the sound wave's coincidence frequency are written.

Results. The damping air property's influence on the thin partition's sound insulation is considered, and its formulas are represented. The formulas for taking into account the reduction of sound insulation at the resonances in sound protective slab or in a partition are also given. The general equation for the thin partition's sound insulation by the method of localized (discrete) parameters are derived. The example of detailed calculation of the sound isolation of the thin asbestos-cement partition is demonstrated. The comparison between the medial three octave deviations of the sound isolation values and the experimental results in case of the SP (Russian normative document) method and in case of the introduced author's method for the different construction materials is represented.

Conclusions. The proposed sound insulation calculation method for the thin light partitions, which is based on the concentrated parameters model, gives very close to experiments results. So, it enables to find the insulation figures across the entire standard frequency range, according to the initial physical and technical materials' and constructions' features.

KEYWORDS: "Mass Action Law", the method of discrete parameters, sound insulation of thin partitions, air noise isolation, surface density, reduced mass, lumped (discrete) mass, wave coincidence, sound insulation lowering on resonances, limit frequency

FOR CITATION: Saltykov I.P. Sound insulation design of the thin partitions on the base of concentrated parameters model. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(3):353-367. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.353-367 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование однослойных звукоизоляционных перегородок с заданными акустическими параметрами — одна из основных задач строительной акустики. В настоящее время основным расчетным методом для получения расчетной частотной характеристики для нормируемого в строительстве диапазона частот является графоаналитический метод, приведенный в своде правил по звукоизоляции¹. Основа этого метода — закон массы, определяющий зависимость звукоизоляции пластины от ее поверхностной плотности при нормальном падении звуковых волн^{2,3,4}. Наряду с нормативным методом существуют и альтернативные эффективные методики расчета звукоизоляции однослойных перегородок [1–7], в частности, разработанный на рубеже XX – начале XXI в. А.В. Захаровым метод расчета звукоизоляции на основе физической модели с сосредоточенными параметрами [8–13], учитывающей условие неразрывности распространения звуковых волн на границе среды и массивного слоя.

Частным случаем расчета звукоизоляции воздушного шума строительными перегородками является задача проектирования тонкостенных перегородок с заданными звукоизоляционными параметрами. Расчетная методика, приведенная в СП, несмотря на достаточно близкие к эксперименту результаты и сравнительную простоту, имеет ограничения в использовании для проектировщиков, так как может применяться только для определенного перечня строительных материалов тонких перегородок (см. п. 3.5 СП). Такое положение вещей обусловлено тем, что алгоритм расчета по данной методике основан на статистической обработке результатов многочисленных измерений частотных звукоизоляционных характеристик перегородок из конкретных строительных материалов с поверхностной плотностью $m_s < 30 \text{ кг/м}^2$ и при этом не имеет под собой строгой, применимой для звукоизоляции тонких перегородок теоретической базы.

В данной статье сделана попытка теоретического и практического обоснования выполнения инженерных расчетов акустических характеристик тонкостенных перегородок, а также уточнения физической модели их звукоизоляции, основанной на сосредоточенных параметрах [8–13].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Известно, что звукоизоляция однородной однослойной акустической пластины $R_{M.A.L.1}$ в общем случае определяется по закону (действия) массы [14]. В общем виде он записывается в виде:

¹ СП 23-103-2003. Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий. М.: Госстрой России, 2004. 34 с.

² Никольский В.Н., Заборов В.И. Звукоизоляция крупнопанельных зданий. М.: Стройиздат, 1964. 243 с.

³ Клюкин И.Н. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах. Л.: Судостроение, 1971. 416 с.

⁴ Крейтан В.Г. Обеспечение звукоизоляции при проектировании жилых зданий. М.: Стройиздат, 1980. 171 с.

$$R_{M.A.L.1} = 10 \lg \frac{1}{\tau} = 10 \lg \frac{1}{\alpha^2} = 10 \lg \left(1 + \left(\frac{\pi f m \cos \theta}{\rho_0 c_0} \right)^2 \right), \text{ дБ}, \quad (1)$$

где τ — коэффициент звукопроницаемости (звукопередачи) пластины при падении звуковой волны под углом θ ; α — коэффициент прохождения скорости колебаний в пластину; f — текущая частота, Гц; m — поверхностная плотность пластины или перегородки, кг/м²; ρ_0 — плотность воздуха, кг/м³; c_0 — скорость звука в воздухе, м/с.

Данная формула позволяет найти звукоизоляцию пластины или строительной перегородки при различных углах падения звуковых волн на ее поверхность в диапазоне до частоты волнового совпадения. Тем не менее известно, что существуют ограничения в ее применении. Согласно принятым положениям теории звукоизоляции, формула (1) не применима для углов падения в диапазоне от 75 до 90°. При таких углах звукоизоляция пластины окажется значительно меньше, чем при нормальном падении звуковых волн. В ряде практических случаев, для которых характерно падение звука на пластины с близкими к исключаемым углам, изоляция, вычисленная по формуле (1), не совпадает с результатами натурных измерений. Например, не наблюдается отличий значений звукоизоляции стен длинных коридоров (при распространении в их пространстве звука параллельно поверхностям стен) от значений звукоизоляции стеновых конструкций в помещениях другой конфигурации (с падением звуковых волн близким к нормальному). Объяснение причин несоответствия закономерностей, обусловленных формулой (1), возможно получить при детальном анализе основных физических параметров, входящих в формулу закона массы.

В формуле (1) в числителе основного слагаемого мы видим массу фрагмента перегородки m , совершающую колебательное движение с частотой f , в знаменателе — плотность фрагмента воздушной среды, обладающего скоростью c_0 . По своей сути, частное, находящееся в квадрате, может рассматриваться как взаимодействие фрагментов двух сред, перегородки и воздуха, обладающих массой. Это прослеживается более явно при записи формулы (1) в виде (2), при $\lambda = c/f$:

$$R_{M.A.L.1} = 10 \lg \left(1 + \left(\frac{\pi m \cos \theta}{\rho_0 \lambda_0} \right)^2 \right), \text{ дБ}, \quad (2)$$

где λ_0 — длина продольной звуковой волны в воздухе, м.

В таком виде слагаемое под логарифмом в квадрате представляет собой отношение поверх-

ностной плотности пластины к массе части среды, ограниченной длиной волны и единичной площадью сечения звукового луча, при этом π является коэффициентом приведения. Таким образом, можно заключить, что при падении звуковой волны на пластину мы наблюдаем взаимодействие двух объектов, имеющих массу и геометрические размеры. Падение звуковых волн на пластину подчиняется закономерностям уравнения неразрывности потока энергии на границах разделов различных сред [15, 16]. Под различными средами подразумеваются воздух и материал пластины, под границами разделов — граница между воздухом и лицевой (поглощающей волны) поверхностью и граница между тыльной поверхностью (излучающей волны) и соприкасающейся с ней воздухом. Согласно условию неразрывности, площадь поперечного сечения звукового луча должна совпадать с площадью участка пластины, накрываемого этим лучом (совпадать со следом луча). По условию неразрывности среды на границе их взаимодействия не должны удаляться друг от друга или взаимно друг в друга проникать.

В свете положений, установленных выше, рассмотрим частный случай, когда при нормальном угле падения волн на пластину $\cos \theta = 1$ и формула (2) преобразуется в выражение (3):

$$R_{M.A.L.1} = 10 \lg \left(1 + \left(\frac{\pi m}{\rho_0 \lambda_0} \right)^2 \right), \text{ дБ}, \quad (3)$$

Геометрическая интерпретация этой формулы приведена на рис. 1, а. Условия неразрывности в этом случае полностью соблюдаются: ширина звукового луча b до падения на пластину соответствует накрываемой им единичной ширине участка пластины с массой m и ширине звукового луча, возникающего за пластиной. В то время как для косого падения звукового луча на пластину при одинаковой его единичной толщине b с единичной толщиной фрагмента пластины и единичной толщиной проходящего через пластину звукового луча, геометрической интерпретации, удовлетворяющей условиям неразрывности передачи звуковой энергии на границе сред получить не удастся: след падающего и прошедшего луча по своей толщине и, соответственно, площади не будет совпадать с шириной и площадью площадки с поверхностной массой m (рис. 1, б). Можно предположить, что процесс наклонного падения звука на пластину при соблюдении условий неразрывности должен выглядеть так, как показано на рис. 1, в: ширина b должна изменяться пропорционально косинусу угла θ , для того чтобы следы падающего и прошедшего лучей совпадали по ширине и единичной площади с площадью взаимодействующего с ними фрагмента пластины с массой m . Тогда для описания процесса прохождения звука

через пластину необходима физическая модель, позволяющая учесть изменение фрагмента воздушной среды с плотностью ρ_0 и скоростью c_0 ограниченного длиной волны λ_0 на рассматриваемой частоте в зависимости от угла падения звуковой волны на пластину. Такая модель могла бы быть описана уравнениями сохранения количества движения и уравнением сохранения количества кинетической энергии, применение которых является традиционным в классической механике [17].

Для рассматриваемого случая уравнение сохранения количества движения (импульса) могло бы выглядеть как выражение (4), а уравнение сохранения кинетической энергии как (5):

$$\rho\lambda v = \rho\lambda v\beta + (\rho\lambda + m)v\alpha; \quad (4)$$

$$\frac{\rho\lambda v^2}{2} = \frac{\rho\lambda(\beta v)^2}{2} + \frac{(\rho\lambda + m)(\alpha v)^2}{2}, \quad (5)$$

где v — единичная скорость движения фрагмента среды; β — коэффициент отражения энергии воздействующего на пластину фрагмента среды; α — коэффициент прохождения энергии движущегося фрагмента среды в пластину.

Уравнение (5) в этой системе уравнений физически обосновано тем, что аналогом закона сохранения кинетической энергии в акустике служит уравнение неразрывности потока энергии. Препятствием для записи уравнения (4) является неприменимость в акустике закона сохранения количества движения, что обусловлено тремя причинами:

- закон сохранения количества движения применим только к замкнутым системам: ни на одно из тел такой системы не должны действовать какие-либо другие тела, не включенные в эту систему; в то время как акустическая среда таковой не является;
- для полной длины продольной волны в формуле (2) значение суммарного вектора скорости равняется нулю;
- в физической модели рассматривается взаимодействие двух разнородных объектов: несжимаемого тела, представляемого сосредоточенной массой, совершающей колебательное движение, и упругой инерционной среды, охватываемой волновым движением.

Как показано в работе [13], для устранения первого ограничения применения уравнения (4) любая площадка слоя пластины виртуально ограничивается частью среды, объем которой определяется длиной волны на рассматриваемой частоте и площадью поперечного сечения, равного площади площадки слоя при нормальном падении звука. Масса этого объема и масса площадки разделяющего слоя аппроксимируются материальными точками, пред-

ставляющими виртуальную замкнутую систему. Второе ограничение применимости уравнения (4) может быть устранено при принятии расчетных значений скоростей получаемых виртуальных масс равными эффективным значениям колебательных скоростей при условии колебания всех масс вдоль одной оси. Для устранения третьего ограничения необходимо привести действие массы части среды, охватываемой одной длиной волны, к эквивалентному действию сосредоточенной массы, это возможно сделать, если ввести соответствующий коэффициент приведения. Если переписать формулу (3) для нормального падения звука, умножив и числитель, и знаменатель слагаемого в квадрате на 2 (6), то для того, чтобы в числителе осталось только значение сосредоточенной массы m , необходимо и числитель, и знаменатель умножить на коэффициент приведения $1/2\pi$:

$$R_{M.A.L.1} = 10 \lg \left(1 + \left(\frac{2\pi m}{2\rho_0\lambda_0} \right)^2 \right), \text{ дБ}, \quad (6)$$

Тогда, как показано в работе [13], целесообразно ввести понятие «приведенной массы»: массы фрагмента среды (в данном случае — воздуха), охватываемого $1/2\pi$ длины волны на текущей частоте, равной:

$$\mu = \rho\lambda / 2\pi, \quad (7)$$

где ρ — плотность среды; λ — длина волны.

Тогда формула для звукоизоляции пластины будет иметь вид (8):

$$R_{M.A.L.1} = 10 \lg \left(1 + \left(\frac{m}{2\mu} \right)^2 \right), \text{ дБ}, \quad (8)$$

В ней умножение знаменателя на 2 объясняется тем, что сосредоточенная масса слоя пластины одновременно взаимодействует с приведенной массой среды перед слоем и такой же приведенной массой за слоем пластины.

Таким образом, в соответствии с вышеизложенными обоснованиями применимости закона сохранения количества движения и преобразованиями (6)–(8) систему уравнений (4), (5) можно переписать в виде:

$$\mu v = \mu v\beta + (\mu + m)v\alpha; \quad (9)$$

$$\frac{\mu v^2}{2} = \frac{\mu(\beta v)^2}{2} + \frac{(\mu + m)(\alpha v)^2}{2}. \quad (10)$$

Совместное решение этих уравнений дает коэффициент прохождения колебательной скорости α :

$$\alpha = \frac{2\mu}{2\mu + m}. \quad (11)$$

Тогда, исходя из определения звукоизоляции и коэффициента прохождения колебательной ско-

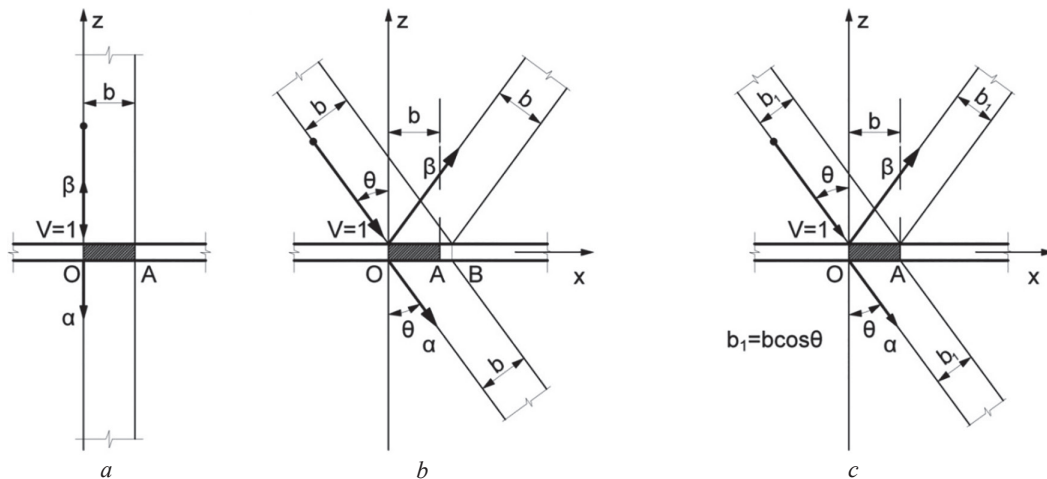


Рис. 1. Схема прохождения звука через звукоизолирующую пластину: *a* — при нормальном падении луча; *b* — при косом падении луча с разрывом массивного слоя и несоблюдением условия неразрывности; *c* — при косом падении луча с соблюдением условия неразрывности, с шириной следа луча, совпадающей с шириной участка пластины

Fig. 1. The scheme of sound propagation through the insulation plate: *a* — is in case of normal incidence; *b* — is in case of oblique beam incidence with a gap in massive layer and under the continuity condition; *c* — is in case of oblique beam incidence under the continuity condition, when the beam trace width coincides with the width of the plate's plot

рости звукоизоляцию пластины можно представить в виде формулы (12):

$$R_{M.A.L.1} = 10 \lg \frac{1}{\alpha^2} = 10 \lg \left(1 + \frac{m}{2\mu_a} \right)^2 = 10 \lg \left(1 + \frac{\pi m}{\rho_0 \lambda_0} \right)^2, \text{ дБ}, \quad (12)$$

где μ_a — приведенная масса рассматриваемого фрагмента воздуха, кг, вычисляется по формуле (13):

$$\mu_a = \frac{\rho_0 \lambda_a a_a b_a}{2\pi}, \text{ кг}, \quad (13)$$

где λ_a — длина волны в воздухе на рассматриваемой частоте, м; a_a — толщина фрагмента воздушной среды (луча), м, взаимодействующего с фрагментом пластины, в данном случае принимается равной 1 и может не учитываться; b_a — ширина фрагмента воздушной среды, м, также принимается равной 1 и может не учитываться.

Примечательно, что в формуле (12) содержатся отличия в записи выражения под логарифмом от формул (6) и (8). Как показывают практические расчеты, при $\rho \lambda \ll m$ результаты вычислений с ее использованием будут приблизительно совпадать с результатами по формулам (6) и (8), и более того, единица под логарифмом в этом случае может не учитываться. Однако в случаях вычисления акустических характеристик тонких перегородок результаты расчетного метода, согласно общепринятой теории звукоизоляции [14] и данного, будут иметь определенные различия, вызванные меньшей разницей значений приведенной массы воздуха и сосре-

доточенной массы тонкой пластины на низких частотах рассматриваемого в строительстве частотного диапазона. Соответственно, в рамках данной статьи для тонких перегородок в последующих вычислениях целесообразно использовать формулу (12).

Для косого падения звука на пластину под углом θ , в соответствии с условием неразрывности и геометрической интерпретацией на рис. 1, с уравнение сохранения количества движения будет выглядеть как выражение (14):

$$\mu \cos \theta \cdot v / \cos \theta = \mu \cos \theta \cdot v \beta / \cos \theta + \mu \cos \theta \cdot v \alpha / \cos \theta + m v \alpha. \quad (14)$$

В этом уравнении значения приведенных масс через косинусы углов падения и отражения звука откорректированы условиями неразрывности, а эффективные значения колебательных скоростей спроецированы на ось z . После сокращений и преобразований получается приведенное выше уравнение сохранения количества движения для нормального падения звуковых волн (9). Таким образом, изоляция звука пластиной или перегородкой определяется по закону массы для нормального падения звука независимо от углов падающих звуковых волн.

Приведенная масса среды и сосредоточенная масса фрагмента звукоизолирующей пластины (перегородки или перекрытия) являются дискретными параметрами, на основе которых построена физическая модель звукоизоляции пластины с сосредоточенными параметрами, учитывающая изменение виртуальных масс фрагментов среды при различных углах падения воздушных волн на пластину.

В соответствии с положениями теории звукоизоляции строительных конструкций и экспериментальными данными звукоизоляция в частотном спектре непрерывно возрастает до частоты примерно на одну октаву ниже, чем так называемая граничная частота, f_L , определяется по формуле (15), при которой из-за процесса волнового совпадения следа падающей звуковой волны в воздухе и изгибных волн в пластине наблюдается резкий провал звукоизоляции в частотном диапазоне, шириной от частоты на одну октаву ниже f_L до f_L ; затем начиная с частоты f_L наблюдается постепенный рост звукоизоляции, составляющий, согласно нормативному документу, 6 дБ на октаву примерно до частоты с ординатой 60–70 дБ; причины этих закономерностей подробно объясняются в работах [2–5].

$$f_L = \frac{c_0^2}{1,8c_{pl.dil}.h_{pl.}}, \text{ Гц}, \quad (15)$$

где $c_{pl.dil.}$ — скорость распространения звуковых продольных волн в материале пластины (ограждения), м/с; $h_{pl.}$ — толщина пластины (ограждения).

Согласно работам [8–13], учитывающим свойства дискретности сплошных сред и законы сохранения энергии и импульса, физическая модель прохождения звука через однослойную пластину ограждения в частотном диапазоне до частоты волнового совпадения f_L будет выглядеть как одновременный упругий удар приведенной массы среды μ_a (воздуха) перед пластиной (ограждением) по сосредоточенной массе пластины m и приведенной массе среды μ_a за пластиной, что соответствует формуле (1). Это обусловлено тем, что упругие свойства пластины до f_L пренебрежительно малы, и пластина рассматривается как несжимаемый объект, в то время как после граничной частоты в пластине возникает волновое движение, и она уже является упругой средой, являясь при этом более акустически прозрачной средой распространения звуковых волн. В диапазоне выше частоты f_L физическая модель прохождения звука через ограждение может быть представлена как одновременный упругий удар приведенной массы среды μ_a перед пластиной по приведенной массе пластины $\mu_{pl.}$ и приведенной массе среды μ_a за пластиной. Таким образом, пластина в диапазоне частот волнового совпадения будет считаться не сосредоточенной массой, а средой распространения изгибных волн, и формула звукоизоляции в этом частотном диапазоне может быть записана в виде (16):

$$\begin{aligned} R_{M.A.L.2} &= 10 \lg \frac{1}{\alpha^2} = 10 \lg \left(1 + \frac{\mu_{pl.}}{2\mu_a} \right)^2 = \\ &= 10 \lg \left(1 + \frac{fm}{2\rho_0 c_0} \right)^2, \text{ дБ}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $\mu_{pl.}$ — приведенная масса пластины, кг, определяется по формуле (17); μ_a — приведенная масса фрагмента воздушной среды, кг, определяемая после частоты волнового совпадения, по формуле (13), при $a_a = 1$ м и $b_a = \lambda_{pl.fl.}$ м.

$$\mu_{pl.} = \frac{\rho_{pl.}\lambda_{pl.fl.}h_{pl.}b_{pl.}}{2\pi}, \text{ кг}, \quad (17)$$

где $\lambda_{pl.fl.}$ — длина изгибной волны в пластине, м, определяется по формуле (18); $\rho_{pl.}$ — плотность материала пластины, кг/м³; b_a — ширина фрагмента пластины, м, принимается равной 1; $h_{pl.}$ — толщина пластины, м.

$$\lambda_{pl.fl.} = \sqrt{\frac{1,8c_{pl.dil.}h_{pl.}}{f}}, \text{ м}, \quad (18)$$

где $c_{п.прод.}$ — скорость распространения продольных волн в материале пластины, м/с, по формуле (19); f — текущая частота, Гц.

$$c_{pl.fl.} = \sqrt{1,8c_{pl.dil.}h_{pl.}f}, \text{ Гц}, \quad (19)$$

На условно выделяемом третьем участке частотного спектра, который в соответствии с экспериментальными исследованиями и нормативными документами, как правило, начинается с частоты с ординатой 65 дБ, в ограждении появляются сдвиговые и продольные волны, скорость распространения которых в пластине не зависит от частоты колебаний и угол волнового совпадения для которых будет только одним [8]. Рост звукоизоляции с ростом частоты на этом участке прекращается. В случае легких перегородок третий участок частотного спектра обычно не рассматривается, так как лежит за пределами нормируемого диапазона.

Формулы (12) и (16) применимы для расчетов изоляции массивных конструкций (пластин весом свыше 50 кг·м²), в этом случае их результаты очень близки к результатам, показываемым расчетной нормативной кривой СП. Тем не менее в случаях их использования для нахождения звукоизоляции тонких ограждений их результаты сильно отклоняются от нормативных кривых в СП для рассматриваемых материалов, а значит, и от реальных значений звукоизоляции [18, 19], так как нормативные кривые были получены на основе статистической обработки большого массива экспериментальных и натурных измерений. В качестве примера это можно проследить на графиках звукоизоляции тонких пластин из асбестоцемента, силикатного стекла и листового стали (рис. 2–4).

Экспериментально наблюдаемое снижение звукоизоляции по сравнению с законом массы объясняется уменьшением значений звукоизоляции на резонансах в пластине [20, 21], возникающих всякий раз, когда по длине или ширине пластины укладыва-

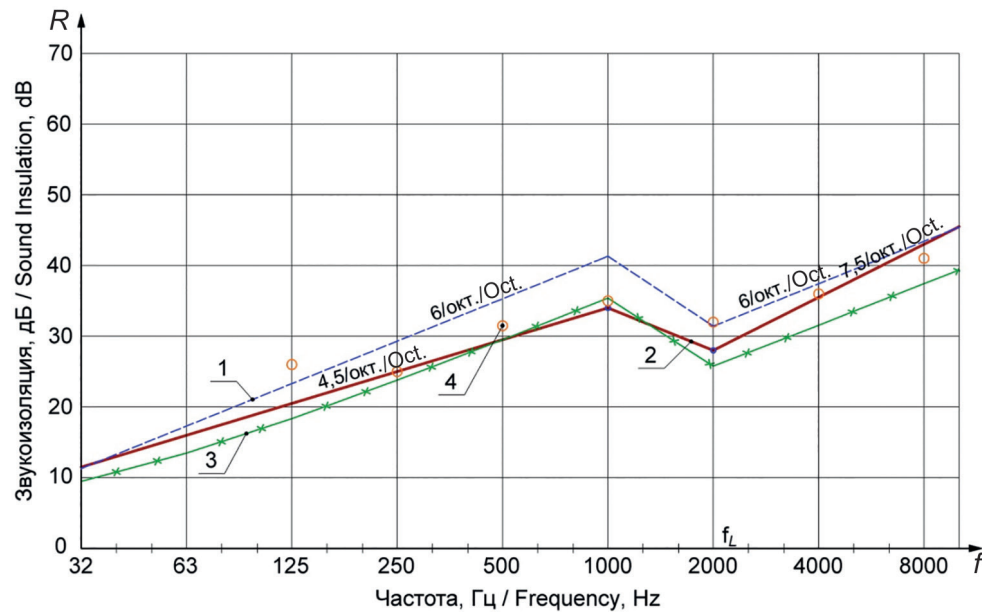


Рис. 2. Графики звукоизоляции для асбестоцементного листа, толщиной 9 мм, с $m = 16 \text{ кг/м}^2$; жесткое соединение: 1 — кривая, построенная по формулам (12) и (16); 2 — по методике СП; 3 — по приводимой в статье методике; 4 — экспериментальные данные

Fig. 2. The graphs for sound insulation of asbestos cement sheet of 9 mm thickness, with $c m = 16 \text{ kg/m}^2$; rigid joint: 1 — is the curve, which is obtained by the formulas (12) and (16); 2 — is obtained by the method of Russian Code Design; 3 — is obtained by the represented in article method; 4 — are the experimental data

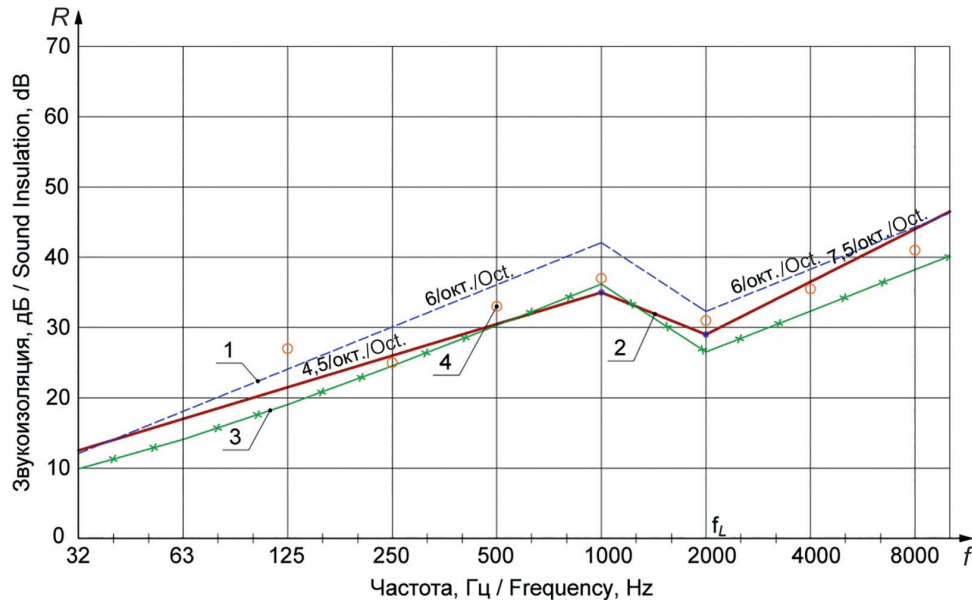


Рис. 3. Графики звукоизоляции для силикатного стекла, толщиной 7,1 мм, с $m = 18 \text{ кг/м}^2$; жесткое соединение: 1 — кривая, построенная по формулам (12) и (16); 2 — по СП; 3 — по приводимой в статье методике; 4 — экспериментальные данные

Fig. 3. The graphs for sound insulation of silicate glass of 7.1 mm thickness, with $c m = 18 \text{ kg/m}^2$; rigid joint: 1 — is the curve, which is obtained by the formulas (12) and (16); 2 — is obtained by the method of Russian Code Design; 3 — is obtained by the represented in article method; 4 — are the experimental data

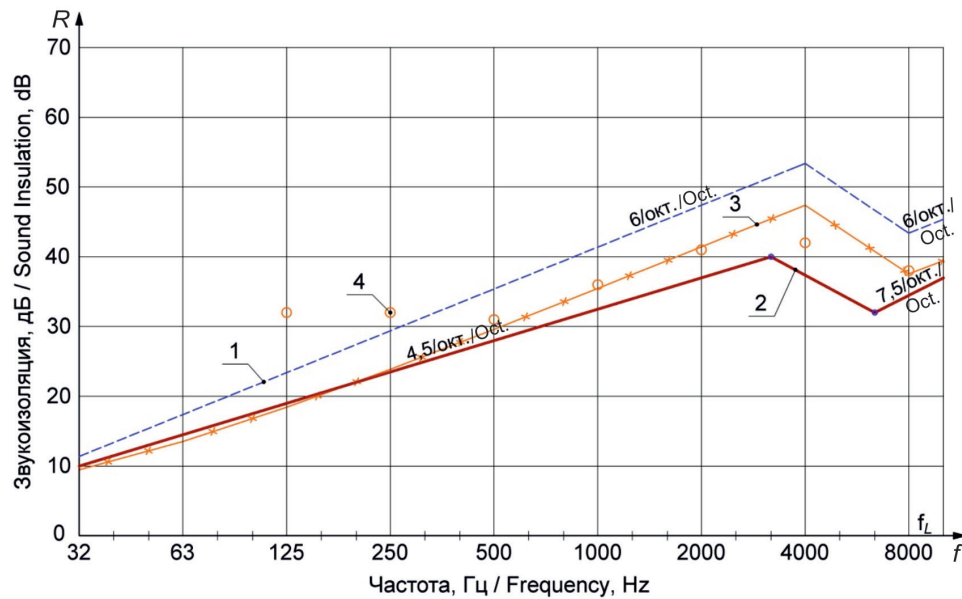


Рис. 4. Графики звукоизоляции для листа стали, толщиной 2,1 мм, с $m = 16,4 \text{ кг/м}^2$; жесткое соединение: 1 — кривая, построенная по формулам (12) и (15); 2 — по СП; 3 — по приводимой в статье методике; 4 — экспериментальные данные

Fig. 4. The graphs for sound insulation of steel sheet of 2,1 mm thickness, with $m = 16.4 \text{ kg/m}^2$; rigid joint: 1 — is the curve, which is obtained by the formulas (12) and (16); 2 — is obtained by the method of Russian Code Design; 3 — is obtained by the represented in article method; 4 — are the experimental data

ется целое число изгибных полуволн: на резонансных частотах амплитуда образованной внешним воздействием волны складывается с амплитудами волн, образованных и распространяющихся после отражения от закрепленных концов пластины. Затухание распространяющихся по пластине колебаний и снижение их амплитуд в первую очередь происходит за счет ухода энергии в примыкающие к пластине (ограждению) конструкции и в меньшей степени за счет потерь на внутреннее трение в материале пластины [20].

Таким образом, в большинстве случаев при практическом расчете потерями энергии на внутреннее трение можно пренебречь и вычислять значения падения звукоизоляции на каждой частоте по сравнению с законом массы только за счет возникновения резонансов, т.е. вычислять поправку $\Delta R_{res.}$:

$$\Delta R_{res.} = -20 \lg \frac{1}{1 - \beta}, \text{ дБ}, \quad (20)$$

где $\beta_1 = \beta_2$ — коэффициенты отражения колебательной скорости от двух противоположных концов рассматриваемого ограждения.

В соответствии с теорией метода сосредоточенных параметров пластина, закрепленная в акустической камере или установленная в проектное положение между ограничивающими ее конструкциями, может рассматриваться либо как среда прохождения изгибных колебаний (волновод), т.е. при-

веденная масса $\mu_{pl.}$, либо как сосредоточенная масса m , а ограничивающая ее с одной из четырех сторон конструкция (фрагмент стенки акустической камеры) также либо как сосредоточенная масса m_w , либо как приведенная масса μ_w . Как показано в работах, посвященных вышеупомянутому методу расчета звукоизоляции, критерием перехода от сосредоточенной массы к приведенной с точки зрения механической постановки задачи является условие (21): на частотах ниже, чем предельная частота $f_{ult.}$, объект является сосредоточенной массой, на более высоких частотах объект служит волноводом, т.е. его масса приведенная:

$$f_{ult.} = \frac{c}{2\pi L}, \text{ Гц}, \quad (21)$$

где $f_{ult.}$ — предельная частота, Гц; L — размер тела, вдоль которого распространяется волна, м; c — скорость распространения в теле рассматриваемого вида волн, м/с.

Как показывают практические вычисления по формуле (21), для легких тонких перегородок на всем стандартном частотном диапазоне можно принимать в качестве сосредоточенного механического параметра приведенную массу $\mu_{pl.}$. Массивные перегородки могут характеризоваться сосредоточенной массой на низких частотах и приведенной на высоких, что зависит от их геометрических параметров. В данном исследовании в связи с отсутствием чет-

ких данных об условиях проведения эксперимента и геометрических размеров примыкающих простенков акустической камеры, а также в связи с большой разницей между толщиной стен акустической камеры и тонкостенной перегородки допустимо использовать в расчетах для стенки акустической камеры приведенную массу μ_w .

Тогда по аналогии с прохождением звука через границу двух сред можно представить передачу колебаний от пластины к примыкающей конструкции как упругое взаимодействие (соударение) приведенных масс, описываемое уравнением сохранения количества движения:

$$\mu_{pl}.v = \mu_{pl}.v\beta + \mu_w.v\alpha \quad (22)$$

и уравнением сохранения кинетической энергии:

$$\frac{\mu_{pl}.v^2}{2} = \frac{\mu_{pl}.(\beta v)^2}{2} + \frac{\mu_w.(\alpha v)^2}{2}, \quad (23)$$

где μ_{pl} — приведенная масса пластины, кг, при изгибных волнах, по формуле (7); μ_w — приведенная масса примыкающей стены акустической камеры, кг, при изгибных волнах, по формуле (24); α и β — коэффициенты прохождения и отражения колебательных скоростей; v — единичная скорость, м/с.

$$\mu_w = \frac{\rho_w.\lambda_{w.fl}.h_w.b_w}{2\pi}, \text{ кг}, \quad (24)$$

где ρ_w — плотность материала стенки акустической камеры, в данном случае — 1800 кг/м³, кирпичная кладка; $\lambda_{w.fl}$ — длина изгибных волн в кирпичной стенке, м; h_w — толщина кирпичной стенки, м; b_w — ширина кирпичной стенки, принимается равной 1 м.

$$\lambda_{w.fl} = \sqrt{\frac{1,8c_{w.dil}.h_w}{f}}, \text{ м}, \quad (25)$$

где $c_{w.dil}$ — скорость распространения изгибных волн в стенках кирпичной камеры, м/с, по формуле (26):

$$c_{pl.fl} = \sqrt{1,8c_{w.dil}.h_w.f}, \text{ Гц}, \quad (26)$$

Тогда из совместного решения этих двух уравнений коэффициенты отражения колебательной скорости β_1 и β_2 при двухстороннем закреплении пластины при линейной постановке задачи могут быть найдены по формуле (27):

$$\beta = \frac{\mu_{pl} - \mu_w}{\mu_{pl} + \mu_w}. \quad (27)$$

Следует отметить, что для некоторых материалов, в частности для алюминиевых сплавов, необходимо учитывать падение значения звукоизоляции не только за счет резонансов в плите, но и за счет коэффициента потерь на внутреннее трение η , которые становятся существенными при условиях закрепления пластины, при которых происходит

почти полное отражение энергии звуковых волн от конструкций, граничащих с торцом пластины. Тогда снижение изоляции на резонансах $\Delta R_{rez.}$ может быть заменено на снижение изоляции, обусловленным только расходом энергии колебаний на внутреннее трение, $\Delta R_{fr.}$ [20]:

$$\Delta R_{fr.} = -20\lg(1 - e^{-\pi\eta}), \text{ дБ}, \quad (28)$$

где η — коэффициент потерь.

В ходе данного исследования авторами статьи было выявлено демпфирующее влияние воздушной среды на колебания тонких пластин на низких частотах. Приведенная масса воздуха на низких частотах μ_a (примерно до 125 Гц) оказывается соизмеримой с сосредоточенной массой тонкого ограждения $m_{pl.}$ (с весом до 30 кг/м²), и энергия колеблющейся пластины расходуется на приведение в колебательное движение примыкающего к ограждению воздуха, что уменьшает изгибное волновое движение в пластине и дает добавочное значение звукоизоляции ΔR_a . Величина этой поправки может быть найдена через коэффициент прохождения колебательной скорости α из пластины в воздух. Для этого запишем уравнения сохранения импульса и кинетической энергии для сосредоточенной массы пластины и приведенных масс воздуха, взаимодействующих с ней с двух сторон, в диапазоне до f_L , получим уравнения (29) и (30):

$$m_{pl}.v = m_{pl}.v\beta + (2\mu_a)v\alpha_1; \quad (29)$$

$$\frac{m_{pl}.v^2}{2} = \frac{m_{pl}.(\beta v)^2}{2} + \frac{(2\mu_a)(\alpha_1 v)^2}{2}. \quad (30)$$

Коэффициент прохождения колебательной скорости α_1 находится из их совместного решения:

$$\alpha_1 = \frac{m_{pl.}}{2\mu_a + m_{pl.}}. \quad (31)$$

Решением аналогичных уравнений сохранения импульса и количества движения для диапазона после f_L , в которых роль сосредоточенной массы ограждения играет приведенная масса $\mu_{pl.}$, будет формула (32):

$$\alpha_2 = \frac{\mu_{pl.}}{2\mu_a + \mu_{pl.}}. \quad (32)$$

Тогда для диапазонов до частоты волнового совпадения и после нее получим формулы поправок на увеличение звукоизоляции тонкой пластины за счет демпфирующих свойств воздушной среды:

$$\Delta R_{a1} = 10\lg(\alpha_1^2) = 10\lg\left(\frac{m_{pl.}}{2\mu_a + m_{pl.}}\right)^2, f < f_L, \text{ дБ}, \quad (33)$$

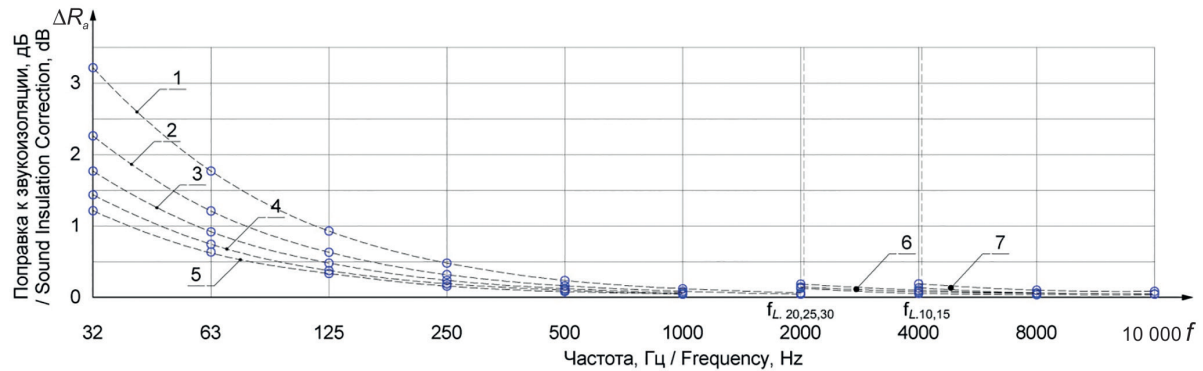


Рис. 5. Графики зависимости поправки звукоизоляции на демпфирующее действие воздуха ΔR_a от частоты для перегородок разного поверхностного веса из асбоцемента: 1 — с поверхностным весом 10 кг/м² до частоты f_L ; 2 — то же с 15 кг/м²; 3 — то же с 20 кг/м²; 4 — то же с 25 кг/м²; 5 — то же с 30 кг/м²; 6 — с поверхностным весом 25 и 30 кг/м² после частоты f_L ; 7 — с поверхностным весом 10, 15 и 20 кг/м² после частоты f_L

Fig. 5. The graph of dependence of the sound insulation correction on the air's damping properties ΔR_a from the frequency for the asbestos cement partition with the different surface weight: 1 — is with the surface weight of 10 kg/m² before the frequency f_L ; 2 — is the same of 15 kg/m²; 3 — is the same of 20 kg/m²; 4 — is the same of 25 kg/m²; 5 — is the same of 30 kg/m²; 6 — is with the surface weight of 25 and 30 kg/m² after the frequency f_L ; 7 — is with the surface weight of 10, 15, and 20 kg/m² after the frequency f_L

$$\Delta R_{a2} = 10 \lg(\alpha_2^2) = 10 \lg \left(\frac{\mu_{pl.}}{2\mu_a + \mu_{pl.}} \right)^2, f > f_L, \text{ дБ. (34)}$$

В качестве примера изображен график зависимости поправки звукоизоляции ΔR_a для асбоцементных листов (рис. 5).

В итоге формулы звукоизоляции тонкой пластины будут иметь следующий вид:

$$R_{tot.1} = R_{M.A.L.1} - \Delta R_{res.} + \Delta R_{a1}; f < f_{гр.}, \text{ дБ. (35)}$$

$$R_{tot.2} = R_{M.A.L.2} - \Delta R_{res.} + \Delta R_{a2}; f > f_{гр.}, \text{ дБ. (36)}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании приведенных выше расчетных закономерностей в качестве примера представлен расчет звукоизоляции асбоцементного листа, толщиной 9 мм. Результаты вычислений по формулам (12)–(36) приведены в табл. 1. График звукоизоляции изображен на рис. 2.

Рассмотренная в данной статье методика была использована для расчета звукоизоляции тонких перегородок из различных материалов, звукоизоляции которых предварительно была измерена экспериментально. Затем были найдены экспериментальные средние по модулю отклонения значений звукоизоляции на октавных частотах от рассчитанных по предложенной методике и методике СП.

Среднее отклонение экспериментальных измерений от СП равнялось 3,11 дБ, среднее отклонение экспериментальных измерений от предложенного метода — 3,33 дБ. Результаты вычислений сведены в табл. 2.

В целом средние значения звукоизоляции, вычисленные по предложенному методу, приблизительно соответствуют полученным по методике российских нормативных документов, что свидетельствует об эффективности метода, рассмотренного в статье.

Следует отметить, что при проводимых по предложенной в статье методике расчетах, условия

Табл. 1. Результаты вычисления звукоизоляции для асбоцементного листа толщиной 9 мм

Table 1. The sound insulation calculation's results for the asbestos cement sheet of 9 mm thickness

Параметры / Parameters	Асбоцементный лист толщиной 9 мм / Asbestos cement sheet of 9 mm thickness
Плотность, кг/м³ / Density, kg/m³	1800
Модуль упругости, кг/см² / Elasticity modulus, kg/cm²	100 000
Толщина пластины, м / Thickness of the plate, m	0,009
Поверхностная плотность, кг/м² / Surface density, kg/m²	16

Окончание табл. 1 / The end of the table 1

Параметры / Parameters	Асбоцементный лист толщиной 9 мм / Asbestos cement sheet of 9 mm thickness									
Скорость продольных волн в пластине, м/с / Dilatational waves velocity in the plate, m/s	2357									
Граничная частота, Гц / Limiting frequency, Hz	≈3000									
Среднегеометрическая частота, Гц / Mediageometry frequency, Hz	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	10 000
Приведенная масса пластины, кг / Reduced mass of the plate, kg	2,84	2,01	1,43	1,01	0,71	0,50	0,36	0,25	0,18	0,16
Приведенная масса воздуха, кг / Reduced mass of the air, kg	2,23	1,12	0,56	0,28	0,14	0,07	4,86 ·10 ⁻³	1,72 ·10 ⁻³	6,08 ·10 ⁻⁴	4,35 ·10 ⁻⁴
Поправка на демпфирующие свой- ства воздуха до граничной частоты, дБ / Sound insulation correction on the air's damping properties below the limiting frequency, dB	-2,12	-1,12	-0,58	-0,30	-0,15	-0,08	—	—	—	—
Поправка на демпфирующие свойства воздуха выше гранич- ной частоты, дБ / Sound insulation correction on the air's damping properties above the limiting frequency, dB	—	—	—	—	—	—	-0,23	-0,12	-0,06	-0,05
Толщина кирпичной стены, м / Thicness of the brick wall, m	0,38									
Приведенная масса стены, кг / Reduced mass of the wall, kg	876,29	619,63	439,90	311,05	219,95	155,53	109,97	77,76	54,99	49,18
Коэффициент отражения / Reflection coefficient	-0,984	-0,988	-0,992	-0,994						
Снижение изоляции на резонан- сах, дБ / Insulation reduction at the resonances, dB	5,95	5,97	5,98	5,99						
Звукоизоляция по формуле закона массы, дБ / Sound insulation by the “Mass Action Law” formula, dB	13,30	18,33	23,74	29,48	35,35	41,30	31,52	37,42	43,38	45,31
Итоговое значение звукоизоля- ции, дБ / Final value of the sound insulation, dB	9,47	13,48	18,34	23,78	29,51	35,38	25,76	31,55	37,45	39,36

Табл. 2. Сравнение средних арифметических отклонений от экспериментальных данных для результатов вычислений звукоизоляции по предложенной методике и методике СП

Table 2. The comparison of average arithmetic deviations from the experimental data for the sound insulation calculations results by the proposed method and by the method of Russian Code Design

Материал перегородки / Partition material	Толщина пере- городки, м / Partition thickness, m	Длина, м / Length, m	Ширина, м / Width, m	Плотность, кг/м ³ / Density, kg/m ³	Среднее отклонение, дБ: / Average deviation, dB:	
					от расчета по СП / from the calculation by the Russian Code Design	от данного расчета / from this calculation
Алюминий, жест- кое соединение / Aluminum, rigid joint	0,0015	1,02	0,48	2700	1,66	1,97
	0,002	2,50	2,50	2700	2,31	3,41
Гипс, жесткое со- единение / Gypsum, rigid joint	0,07	1,02	0,48	1100	3,67	2,13
	0,01	1,02	0,48	1100	2,25	1,74
	0,007	1,02	0,48	1100	2,09	2,21

Материал перегородки / Partition material	Толщина пере- городки, м / Partition thickness, m	Длина, м / Length, m	Ширина, м / Width, m	Плотность, кг/м³ / Density, kg/m³	Среднее отклонение, дБ: / Average deviation, dB:	
					от расчета по СП / from the calculation by the Russian Code Design	от данного расчета / from this calculation
Оргстекло, жест- кое соединение / Organic glass, rigid joint	0,015	1,2	1,08	1200	3,02	3,74
	0,0042	1,02	0,48	1200	1,42	1,90
Дюралюминий, жесткое соедине- ние / Duralumin, rigid joint	0,005	1,2	1,08	2800	2,78	3,15
	0,005	0,54	0,50	2800	4,18	4,59
	0,005	1,0	0,50	2800	2,72	2,61
	0,003	1,2	1,08	2800	2,99	2,56
Дюралюминий, упругое соедине- ние / Duralumin, elastic joint	0,003	1,02	0,48	2800	3,80	2,97
Сталь, жесткое соединение / Steel, rigid joint	0,0021	0,74	0,47	7800	5,75	4,28
Сталь, упругое соединение / Steel, elastic joint	0,0021	0,74	0,47	7800	5,98	8,71
Стекло силикатное, жесткое соедине- ние / Silicate glass, rigid joint	0,0071	0,74	0,47	2500	2,43	3,20
Стекло силикатное, упругое соедине- ние / Silicate glass, elastic joint	0,0071	0,74	0,47	2500	4,43	3,41
Асбоцементный лист, жесткое сое- динение / Asbestos- cement sheet, rigid joint	0,009	0,74	0,47	1800	2,14	3,64
Асбоцементный лист, упругое сое- динение / Asbestos- cement sheet, elastic joint	0,009	0,74	0,47	1800	4,57	3,70
Общее среднее отклонение от эксперимента / Total average deviation from the experiment					3,23	3,33

закрепления пластин (жесткие или упругие) не учитывались: учет этого влияния является целью дальнейших исследований авторов.

ВЫВОДЫ

Звукоизоляция однослойных, в частности, тонких перегородок не зависит от различных значений угла падения звука на поверхность пластины (перегородки).

Формула закона массы до частоты волнового совпадения, полученная на основе совместного решения уравнений сохранения в рамках применения

метода сосредоточенных параметров, очень близка к ее традиционному виду и дает аналогичные результаты звукоизоляции в случае массивных перегородок. При расчете звукоизоляции на низких частотах для легких перегородок результаты вычислений по ней будут иметь определенные отличия.

Наиболее существенный вклад в расчетные значения звукоизоляции на измеряемых частотах вносит поправка $\Delta R_{res.}$, учитывающая падения звукоизоляции на резонансах на всех частотах между возбуждаемыми внешним воздействием и уже бегущими, отражающимися от краев, поперечными волнами в пластине.

На низких частотах наблюдается демпфирующее действие воздушной среды ΔR_a , повышающее звукоизоляцию.

Получена формула для практического инженерного метода расчета звукоизоляции с учетом волнового совпадения, резонансных явлений и демпфирующего влияния воздушной среды.

Проведено сравнение результатов полученной методики и методики нормативных документов с реальными измерениями. Выявлена близость результатов расчетов по предложенному методу с экспериментом и методом СП.

Предложенная физическая модель прохождения звука через тонкие перегородки требует дальнейших уточнений и экспериментальных подтверждений для получения возможно более простых в использовании алгоритмов расчета. Кроме того, использование тонкостенных перегородок в акустике, как правило, сопряжено с их применением в многослойных конструкциях, имеющих воздушные или заполненные звукопоглощающими материалами полости. Эффективные расчетные методики для подобных конструкций еще предстоит разработать в рамках предложенной в статье модели с сосредоточенными параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щелоков Ю.А. Универсальная формула расчета звукоизоляции однослойных преград // *Noise Theory and Practice*. 2016. Т. 2. № 1 (3). С. 2–7. URL: http://media.noisetp.com/filer_public/1b/3c/1b3c3b47-e3e7-41ce-ad0f-a62734297353/p_2-7_rus.pdf (дата обращения: 05.03.20).
2. Zdražilova N., Donova D., Skotnicova I. Analysis of Predictive Calculation Methods of Airborne Sound Insulation // *Applied Mechanics and Materials*. 2016. Vol. 835. P. 573–578. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.835.573
3. Neubauer R.O., Kang J. Airborne sound insulation in terms of a loudness model // *Applied Acoustics*. 2014. Vol. 85. P. 34–45. DOI: 10.1016/j.apacoust.2014.03.024
4. Ye J. Applying Immune Algorithms to the Calculation of Sound Insulation of Walls // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 584–586. P. 1853–1857. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.584-586.1853
5. Rodríguez-Molares A. A new method for auralisation of airborne sound insulation // *Applied Acoustics*. 2013. Vol. 74. Issue 1. P. 116–121. DOI: 10.1016/j.apacoust.2012.06.017
6. Huang X.F., Yang Z.X., Yang Y. Prediction on Sound Insulation to a Single-Leaf Wall // *Advanced Materials Researches*. 2012. Vol. 594–597. P. 2824–2827. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.594-597.2824
7. Жоголева О.А., Гиясов Б.И., Федорова О.О. Методика определения звукоизоляции ограждений квартир по условиям защиты от шума // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 10 (109). С. 1153–1162. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.10.1153-1162
8. Захаров А.В. Дискретные модели прохождения волн при расчетах звукоизоляции в зданиях // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 11. С. 50–54.
9. Zakharov A. About some misunderstandings in the modern theory of the sound isolation and discrete models of sound transmission // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 467. P. 361–366. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.467.361
10. Захаров А.В. Условия неразрывности и законы сохранения механики в задачах о прохождении звука // *Научное обозрение*. 2016. № 1. С. 94–97.
11. Zakharov A.V. Revisiting the dependence of sound transmission on the angle of incidence at the interface between media or massive layer // *Jr. of Industrial Pollution Control*. 2017. Vol. 33. Issue 1. P. 878–882. URL: <http://www.icontrolpollution.com/articles/revisiting-the-dependence-of-sound-transmission-on-the-angle-of-incidence-at-the-interface-between-media-or-massive-layer.php?aid=85824> (дата обращения: 05.03.20).
12. Zakharov A. Discrete models upon calculation of soundproofing by solid // *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2018. Vol. 119. Issue 10. P. 439–443. URL: <https://acadpubl.eu/jsi/2018-119-10/articles/10c/54.pdf> (дата обращения: 05.03.2020).
13. Захаров А.В. Обеспечение условий неразрывности при косом прохождении звука через массивную пластину // *Инновации и инвестиции*. 2018. № 12. С. 163–166.
14. Овсянников С.Н., Старцева О.В. Теоретические и экспериментальные исследования звукоизоляции перегородок // *Вестник ТГАСУ*. 2013. № 2. С. 176–184.
15. Козаченко Р.А., Пашина А.С. Исследование пучка акустических волн, проходящих через границу раздела двух сред при излучении многочастотным преобразователем // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2012. № 1. С. 13–19.
16. Чертова Н.В., Гриняев Ю.В. Закономерности напряженно-деформированного состояния на границе раздела упругих сред при идеальном контакте // *Физическая мезомеханика*. 2018. Вып. 21. № 2. С. 56–67.
17. Шарафутдинов Г.З. Соотношение между законами сохранения энергии и импульса // *Тенденции развития науки и образования*. 2019. № 48. Ч. 5. С. 95–100. DOI: 10.18411/lj-03-2019-113

18. Овсянников С.Н., Лелюга О.В. Исследование звукоизолирующей способности облегченных перегородок // Вестник ТГАСУ. 2014. № 5. С. 98–105.

19. Романенко Э.А., Русских Г.С., Соколовский З.Н. Прогнозирование звукоизоляции в области низких частот гибкими панелями с учетом динамики и соотношения разделяемых объемов // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6. № 1. С. 104–109. DOI: 10/25206/2310-9793-2018-6-1-104-109

20. Разживин В.М. Изоляция воздушного шума легкими ограждающими конструкциями зданий с учетом их закрепления : монография. Пенза, 2014. 120 с.

21. Glushkov E., Glushkova N., Eremina A., Lamerling R. Trapped modes and resonance wave transmission in a plate with a system of notches // Journal of Sound and Vibration. 2018. Vol. 412. P. 360–371. DOI: 10.1016/j.jsv.2017.09.041

Поступила в редакцию 21 ноября 2019 г.

Принята в доработанном виде 12 декабря 2019 г.

Одобрена для публикации 27 февраля 2020 г.

О Б АВТОРЕ: **Иван Петрович Салтыков** — старший преподаватель кафедры архитектуры; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 813243, Scopus: 57197806793; pz@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Schelokov Y.A. Universal formula of calculation of sound insulation of single-layer barriers. *Noise Theory and Practice*. 2016; 1(3):2-7. URL: http://media.noisetp.com/filer_public/1b/3c/1b3c3b47-e3e7-41ce-ad0f-a62734297353/p_2-7_rus.pdf (Accessed 05.03.2020). (rus.).

2. Zdražilova N., Donova D., Skotnicova I. Analysis of Predictive Calculation Methods of Airborne Sound Insulation. *Applied Mechanics and Materials*. 2016; 835:573-578. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.835.573

3. Neubauer R.O., Kang J. Airborne sound insulation in terms of a loudness model. *Applied Acoustics*. 2014; 85:34-45. DOI: 10.1016/j.apacoust.2014.03.024

4. Ye J. Applying Immune Algorithms to the Calculation of Sound Insulation of Walls. *Applied Mechanics*. 2014; 584-586:1853-1857. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.584-586.1853

5. Rodríguez-Molares A. A new method for auralisation of airborne sound insulation. *Applied Acoustics*. 2013; 74(1):116-121. DOI: 10.1016/j.apacoust.2012.06.017

6. Huang X.F., Yang Z.X., Yang Y. Prediction on Sound Insulation to a Single-Leaf Wall. *Advanced Material Researches*. 2012; 594-597:2824-2827. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.594-597.2824

7. Zhogoleva O.A., Giyasov B.I., Fedorova O.O. Methodology for determination of sound insulation of apartments' enclosing structures to meet noise protection requirements. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(10):1153-1162. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.10.1153-1162 (rus.).

8. Zakharov A.V. Discrete models of passage of waves for calculation of sound insulation in buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2012; 11:50-54. (rus.).

9. Zakharov A. About some misunderstandings in the modern theory of the sound isolation and discrete models of sound transmission. *Applied Mechanics and Materials*. 2013; 467:361-366. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.467.361

10. Zakharov A.V. Continuity conditions and the conservation laws of mechanics in the problems of sound origin. *Scientific Review*. 2016; 1:94-97. (rus.).

11. Zakharov A.V. Revisiting the dependence of sound transmission on the angle of incidence at the interface between media or massive layer. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017; 33(1):878-882. URL: <http://www.icontrolpollution.com/articles/revisiting-the-dependence-of-sound-transmission-on-the-angle-of-incidence-at-the-interface-between-media-or-massive-layer-.php?aid=85824>. (Accessed 05.03.2020).

12. Zakharov A.V. Discrete models upon calculation of soundproofing by solid plate. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2018; 119(10):439-443. URL: <https://acadpubl.eu/jsi/2018-119-10/articles/10c/54.pdf> (Accessed 05.03.2020).

13. Zakharov A.V. Providing continuity conditions for oblique sound transmission through a massive plate. *Innovation and investment*. 2018; 12:163-166. (rus.).

14. Ovsyannikov S.N., Startseva O.V. Theoretical and experimental researches of sound insulation of partitions. *Vestnik TSUAB*. 2013; 2:176-184. (rus.).

15. Kozachenko R.A., Pashnja A.S. Research of the bunch of acoustic waves passing through from border of section of two environments at radiation by the multifrequency converter. *Proceedings of the southern Federal University. Engineering Sciences*. 2012; 1: 13-19. (rus.).

16. Chertova N.V., Grinyaev Yu.V. Features of the stress-strain state at the interface between elastic

media under perfect contact conditions. *Physical Mesomechanics*. 2018; 21(2):56-67 (rus.)

17. Sharafutdinov G.Z. The relationship between the energy conservation and the momentum conservation laws. *Development trends of science and education*. 2019; 48(5):95-100. DOI: 10.18411/lj-03-2019-113 (rus.)

18. Ovsyannikov S.N., Lelyuga O.V. Sound insulation of lightweight wall panel systems. *Vestnik TSUAB*. 2014; 5:98-105. (rus.)

19. Romanenko E.A., Russkikh G.S., Sokolovskiy Z.N. Prediction of sound insulation of flexible panels in low frequencies with dynamics and volume relations.

Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. 2018; 6(1):104-109. DOI: 10/25206/2310-9793-2018-6-1-104-109 (rus.)

20. Razzhivin V.M. *The air noise insulation by the use of lightweight enclosing structures of the buildings, subject to their fastening. The monograph*. Penza, 2014; 120. (rus.)

21. Glushkov E., Glushkova N., Eremina A., Lammering R. Trapped modes and resonance wave transmission in a plate with a system of notches. *Journal of Sound and Vibration*. 2018; 412:360-371. DOI: 10.1016/j.jsv.2017.09.041

Received November 21, 2019.

Adopted in a revised form on December 12, 2019.

Approved for publication February 27, 2020.

B I O N O T E S : **Ivan P. Saltykov** — senior lecturer of the Department of Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 813243, Scopus: 57197806793; pz@mgsu.ru.

Моделирование тепло-ветрового режима городской улицы в г. Ханое

Ле Минь Туан, И.С. Шукуров

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Одной из основных задач архитектуры и градостроительства является создание максимально оптимальных, комфортных и безопасных условий для жизни, работы и отдыха людей. Эта задача не может быть решена без учета тепло-ветровых факторов городской среды, ответственных за ветровую нагрузку, аэрационный и тепловой режимы города. Качество тепловой среды в районах с высокой плотностью застройки зависит от местного климата и характеристик городского дизайна. Особенность городского климата часто связана с явлением городского острова тепла (ГОТ), которое характеризуется более высокой температурой в городской местности по сравнению с сельскими территориями. Моделирование городского тепло-ветрового режима проводилось для оценки температуры и скорости воздуха городских улиц г. Ханоя.

Материалы и методы. Вычислительная гидродинамика (CFD) использует численные методы для решения уравнений управления механикой жидкости с помощью компьютера для прогнозирования поля потока. Применена версия ANSYS 19.1 программного комплекса FLUENT для моделирования анализа городских уличных тепловых сред. Проведен ряд экспериментов на городских улицах, размещенных в городской местности Чунг Хоа-Нхан Чинь в районе Тхань Суан (г. Ханой).

Результаты. Наиболее высокие температуры наблюдались на юго-восточной стороне зданий. Таким образом, снижение плотности застройки и сохранение расстояния между зданиями будет способствовать движению ветра и охлаждению городских улиц.

Выводы. Наибольший вклад в работу вносит использование микрометеостанции. Анализ оценки окружающих зданий, озеленение и проектирование теневых зон можно рекомендовать в качестве мероприятий по улучшению теплового комфорта улиц.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микроклимат, городской остров тепла, городской ветер, озеленение, городское планирование, тепловой комфорт, городская тепловая среда

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ле Минь Туан, Шукуров И.С. Моделирование тепло-ветрового режима городской улицы в г. Ханое // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 3. С. 368–379. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.368-379

Computational fluid dynamics analysis for thermal-wind environment simulation of urban street in Hanoi city

Le Minh Tuan, Ilkhomzhon S. Shukurov

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

ABSTRACT

Introduction. One of the most important tasks in architecture and urban planning is to create the most optimal, comfortable and safe environment for human's live, work and leisure. This issue cannot be solved without taking into account the environment factor such as temperature and wind in a city. Modeling of the urban thermal-wind regime has been carried out to assess the temperature and air speed of the city streets of Hanoi.

Materials and methods. Computational Fluid Dynamics (CFD) uses numerical methods to solve fluid mechanics equations by using a computer model to predict flow fields. In this study, author has used ANSYS 19.1 of the FLUENT software package to conduct the model analysis of urban street thermal environments. The study conducted a series of experimental procedures in urban street alleys that were oriented towards placement in the urban area of Trung Hoa Nhan Chinh in the Thanh Xuan district, Hanoi cit.

Results. The highest temperatures were observed around the southeast side of the buildings in the urban area of Trung Hoa Nhan Chinh. Thus, a decrease in building density and maintaining the distance between buildings will contribute to the movement of the wind to cool city streets.

Conclusions. The greatest contribution to the work has been created by using a micro-weather station. Analysis of the assessment of the surrounding buildings, landscaping, shade and human activities can recommend measurable improvement the thermal comfort of the streets.

KEYWORDS: microclimate, urban heat island, urban wind, landscape, urban planning, thermal comfort, urban thermal environment

FOR CITATION: Le Minh Tuan, Shukurov I.S. Computational fluid dynamics analysis for thermal-wind environment simulation of urban street in Hanoi city. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(3): 368-379. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.368-379 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Ханой урбанизируется с каждым годом все быстрее. Общая численность населения значительно возросла с 2685 тыс. (1999 г.) до 7328 тыс. человек (2016 г.), увеличившись на 4643 тыс. человек за 17 лет, при этом темпы роста составили в среднем 273 тыс. человек в год. Процесс урбанизации связан с экономическим развитием Ханоя. В результате интенсивного освоения территории и активного использования энергетических ресурсов городская температура в Ханое повышается. Наблюдения за эффектом островов городского тепла показали, что высокие температуры в городах значительно влияют на жизнь людей.

В настоящее время в мире популярен метод исследования эффекта теплового острова, включающий фиксированные данные метеостанции [1], с использованием мобильных методов наблюдения [1, 2] и метода анализа изображений дистанционного зондирования в качестве основного инструмента для измерения [3]. Эти исследования направлены на изучение изменений температуры в городе и не рассматривают комфортные условия для человека.

Вычислительный гидродинамический анализ (Computational Fluid Dynamics — CFD) позволяет проводить сравнительный анализ эффектов городского острова тепла (ГОТ) на основе различных сценариев. Многие исследователи широко использовали вычислительный гидродинамический анализ для изучения ветровых течений [4] и влияния естественного проветривания [5, 6].

На развитие ГОТ влияют несколько факторов: искусственная температура, влажность; загрязняющие вещества и непроницаемые поверхности, снижающие испарение и альбедо, что определяет поглощение и отражение солнечного излучения поверхностями; а также тепловое излучение в зданиях [7]. Высокие проценты альбедо поверхности асфальта и фасадов зданий приводят к высоким дневным температурам поверхности [8]. Проанализирована взаимосвязь между эффектом теплового острова и основой городской планировки. Изучены показатели, обеспечивающие тепловой комфорт наряду с технологией уменьшения температуры [9, 10]. Отражающая способность здания и структуры го-

родского покрытия представляет собой важную энергетическую особенность, позволяющую сократить эффект ГОТ в летнее время [11–13].

Исследования городской тепловой среды направлены на изучение взаимосвязи между эффектом ГОТ и факторами города в виде неба [14]. Исследования подтвердили, что растительность является формой покрывающего материала, который можно использовать для снижения температуры [15]. Растительность считается стратегическим ресурсом городского климат-контроля в субтропических городах [16].

Чтобы проанализировать взаимосвязь между геометрией улиц и тепловой средой в городах, нами исследованы и собраны данные, полученные с использованием портативных термометров и инструментов вычислительной гидродинамики (CFD).

Номенклатура

C_p — удельная теплоемкость воздуха при 300 (Дж/кг·К);

Fr — число Фруда;

I_g — солнечное излучение (Вт/м²);

H — высота уличного каньона (м);

H/B — соотношение сторон (высоты и ширины) улиц;

k — турбулентная кинетическая энергия (м²/с²);

K — константа фон Кармана;

q^* — чистый поток всех волн (Вт/м²);

q_F — антропогенный тепловой поток (Вт/м²);

q_H — турбулентные потоки ощутимого тепла (Вт/м²);

q_E — турбулентные потоки скрытого тепла (Вт/м²);

T — температура воздуха, °С;

U — интенсивность скорости воздуха (м/с);

U^* — скорость трения (м/с);

z — высота от земли (м);

Z_0 — шкала длины неровностей притока (м);

α — поглощение солнечного излучения;

δ — глубина пограничного слоя атмосферы (м);

ε — скорость рассеяния турбулентности (м²/с²);

Δq_s — чистое поглощение или выделение энергии при ощутимых тепловых изменениях (Вт/м²);

Δq_A — чистый горизонтальный адвентивный тепловой поток (Вт/м²);

ΔT_{u-r} — разница температур между городом и загородным, °С;

μ — динамическая вязкость (кг/м·с);

Ψ_0 — фактор тени;

Ψ_s — фактор обзора неба;

Ψ_m — интегрированная функция устойчивости для импульса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Форма городской улицы

Форма городской улицы обычно описывается соотношением H/B , где H — высота, а B — ширина улицы. Улицы можно классифицировать как регулярные, когда отношение $H/B = 1,0$; бульварными при отношении $H/B = 0,5$ и ниже; репрезентативными, если $H/B = 2,0$ и выше. Длина улицы L представляет собой расстояние между двумя главными перекрестками. Данное соотношение можно классифицировать как короткие — при $L/H < 3$; средние — при $L/H < 7$ и длинные — при $L/H > 7$.

В случае перпендикулярного потока воздушный поток улицы характеризуется ростом одного или нескольких вихрей. Отношение H/B в диапазоне от 0,65 до 1,6 создает один вихрь, в то время как более высокое H/B отношение вызывает развитие множества вихрей [17, 18].

Режим воздушного потока в улице определяется плавающим эффектом для скоростей ветра ниже 2,0 и 3,0 м/с [19]. Надежным параметром, часто используемым для описания баланса между силой инерции и плавающей силой, является число Фруда (Fr). Число Фруда близко к единице, которая указывает на преобразование между двухстрочными режимами, поскольку оно зависит как от температуры фасада стены, так и от скорости ветра [19]. Городская форма в основном влияет на режим воздушного потока в улицах, а не на климат пограничного слоя [20].

Городской остров тепла

Развитие городского теплового острова связано с энергетическим балансом урбанизированной территории. В частности, наиболее релевантными являются размер и расстояние зданий, городская геометрия, расчет излучения городских материалов, солнечная радиация, а также тепловое излучение. Городской энергетический баланс определяется [21]:

$$q^* + q_F = q_H + q_E + \Delta q_s + \Delta q_A, \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \quad (1)$$

где q^* — общее излучение; q_F — общее количество искусственного тепла от тепла, выделяемого при сгорании топлива; q_H и q_E — хаотический и скрытый тепловой поток соответственно; Δq_s — поглощение или выделение энергии при разумном изменении тепла в вероятности попадания воздуха на городскую поверхность почвы; Δq_A — общее прямое излучение тепла.

Экспериментальные исследования показали, что температура поверхности городских улиц в дневное время достигает отметки в 20 °С, что сравнивается с температурой поверхности на высоте строительной площадки [22, 23].

Ночью воздух в городских центрах обычно теплее, чем воздух в сельских районах, поэтому остров тепла города определяет разницу температур между городом и загородными территориями (ΔT_{u-r}), которая появляется за счет разницы в энергетическом балансе.

В книге климата пограничного слоя (T.R. Oke) были упомянуты две эмпирические зависимости между интенсивностью ГОТ и отношением высоты здания и расстояния H/B или функцией элемента неба [21]:

$$\Delta T_{u-r} = 7,54 + 3,97 \cdot \ln\left(\frac{H}{B}\right); \quad (2)$$

$$\Delta T_{u-r} = 15,27 - 13,88 \cdot \Psi_s; \quad (3)$$

$$\Psi_s = \cos\left(a \tan\left(\frac{2H}{B}\right)\right). \quad (4)$$

Описание метода вычислительного гидродинамического анализа CFD

Вычислительная гидродинамика CFD является сферой, которая стремительно развивалась с 1960-х годов и добилась значительных результатов за последние 50 лет. CFD использует численные методы для решения уравнений управления механикой жидкости с помощью компьютера для прогнозирования поля потока. В этом исследовании была применена версия ANSYS 19.1 программного комплекса FLUENT для моделирования анализа городских уличных тепловых сред, а также данных теплового комфорта с использованием измеренных экологических данных для сравнения. С помощью моделирования вычислительного гидродинамического анализа CFD, как ожидается, будет определен предлагаемый план по улучшению уличной среды и потенциальные выгоды.

Текущий поток внутри городской аллеи был рассчитан путем решения двумерных уравнений стационарного состояния Рейнольдса усредненного Навье — Стокса (RANS) с помощью FLUENT-кода. В стационарной модели RANS свойства тока разделяются на их среднюю и осциллирующую составляющие путем разделения Рейнольдса.

Исходный код FLUENT предоставляет несколько диаграмм турбулентности, включая модель $k-\omega$ и множество ее вариантов, а также модель возмущений напряжения Рейнольдса [24]. В области течения и теплового слоя изучается картина турбулентности $k-\epsilon$. Согласно модели возмущений, напряжение Рейнольдса изотропно и поэтому доста-

точно учесть два дополнительных уравнения: одно для кинетической энергии и одно для скорости диссипации ϵ .

Исходный код FLUENT позволяет при расчете чистого излучения установить солнечную модель на основе положения на поверхности земли (широте и долготе), направлении модели (северном), времени дня, сезоне и условиях, установленных для ясной или облачной погоды. Чтобы решить эту проблему, давление основано на простом алгоритме, который представляет собой соотношение между скоростью и коррекцией давления для обеспечения сохранения объема и получения используемых областей давления. Однако в изученной аллее и термическом слое стандартной моделью возмущений $k-\epsilon$ является часто используемая модель.

В исследовании от 19 октября 2018 г. для сбора данных о температуре и ветре городской местности Чунг Хоа-Нхан Чинь применялось мобильное климатическое измерительное устройство с использованием данных моделирования вычислительного гидродинамического анализа CFD для анализа улиц и данных измерения температуры окружающей среды, можно предложить эффективный подход к уменьшению явлений ГОТ.

Тепловой комфорт — это форма субъективной оценки температуры окружающей среды, влажности, скорости ветра, средней радиационной температуры, деятельности человека, одежды и других факторов. В целом в этом исследовании фактические данные измерений включали много разных категорий. Индекс теплового комфорта, подлежащий оценке, был окончательно проанализирован по факторам окружающей среды городских улиц, чтобы уточнить состав городских улиц и тепловой комфорт.

Территория исследования

Город Ханой (21 0278 ° с. ш., 105 8342 ° в. д.) — один из крупнейших городов Вьетнама, расположенный на сложной местности, спускающейся с севера на юг и с запада на восток, из которой на дельту приходится 75 % города. На природной территории средняя высота Ханоя составляет 5–20 м над уровнем моря, поэтому климатические условия характеризуются жарким, влажным летом и холодной зимой. Среднегодовая температура составляет 24,5–25,3 °С, годовое количество осадков около 263,7 мм. В этом исследовании был проведен ряд экспериментальных процедур в городских переулках, которые были ориентированы на размещение в городской местности Чунг Хоа-Нхан Чинь в районе Тхань Суан, г. Ханой. Центр города состоит из асфальтированных улиц, а фасад здания выполнен из бетона, обычно покрытого штукатуркой или кирпичом.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Настройка модели

В данном исследовании используется гидродинамика, рассчитанная с помощью программного комплекса Fluent Fluid Flow от ANSYS 19.1. В ANSYS 19.1 вычислительная гидродинамика выполняется в конечных полях, соответствующие параметры задаются в эталонном наборе, и результаты моделирования легче ориентировать на стационарное состояние. Поэтому процесс работы программного обеспечения должен сначала создать 3D-модель опорного поля в области моделирования. Для поддержания эффективности модельных расчетов разработанная для данного исследования модель упрощает модель зданий с одинаковым количеством этажей.

Сетка настройки

Моделирование вычислительного гидродинамического анализа CFD основано на теории «сетки». При заполнении модели улицы очень важен метод настройки сетки. Он включает форму, размер, плотность и толщину сетки, а также ряд других параметров. Сетка может быть смоделирована разными способами в соответствии с реальной ситуацией [25]. В целом использование шестигранных блоков в качестве узлов зацепления может быть достигнуто с помощью моделирования вычислительного гидродинамического анализа CFD для моделирования во многих случаях. Для получения наиболее точных результатов моделирования, поскольку производительность процессора и данные могут сходиться в устойчивом состоянии, тетраэдрическое зацепление является наиболее эффективным методом для этого исследования (рис. 1).

Установка условий

Для определения взаимосвязи между уличным теплом и комфортом в работе используются данные, связанные с факторами окружающей среды, и с помощью мобильного климатического счетчика измеряется степень благоприятности. В настоящем исследовании метеорологические данные, полученные 19 октября 2012 г., были использованы в качестве базового условия для моделирования вычислительного гидродинамического анализа CFD.

Ветровой режим

В ходе исследования данные о суточном направлении ветра были взяты за основу поля ветра. Они показывают, что преобладающее направление ветра юго-восточное.

Антропогенное тепло

Было проведено несколько имитаций моделирования вычислительного гидродинамического анализа CFD для оценки теплопередачи, в которой расчетная модель имеет следующие параметры: от-

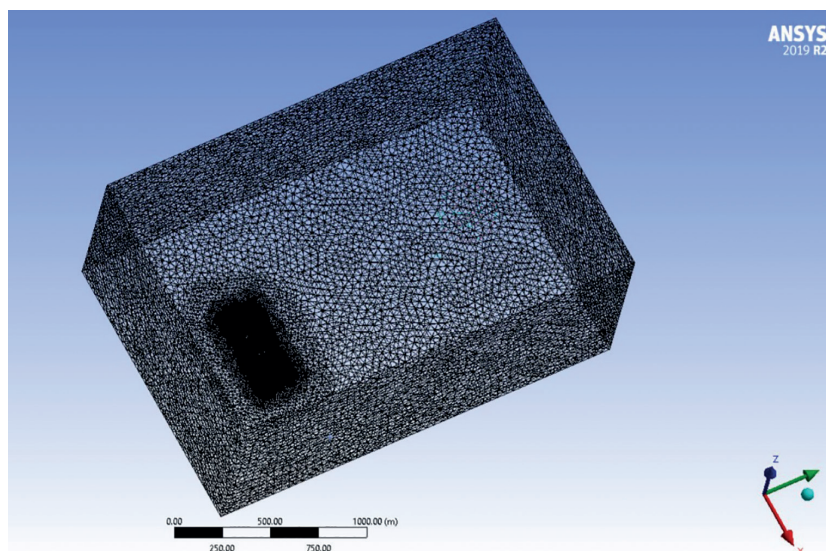


Рис. 1. Имитационная вычислительная сетка

Fig. 1. Imitative computational mesh

ношение $H/B = 7$ и $L/B = 33$; ширина и высота самого большого здания — 62 м; ширина улицы — 15 м; а длина улицы — 492 м (рис. 2). На земле была смоделирована установка следующих параметров: плотность — 1000 кг/м^3 ; удельная теплоемкость — $1000 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; теплопроводность — $2 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; коэффициент излучения — 0,9; поглощение солнечного излучения (прямое видимое и инфракрасное) — 0,8. Стены здания имеют: удельная теплоемкость — $1000 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; теплопроводность — $0,15 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; толщина — 0,30 м; коэффициент излучения — 0,9; поглощение солнечного излучения (прямое видимое и инфракрасное) — 0,8.

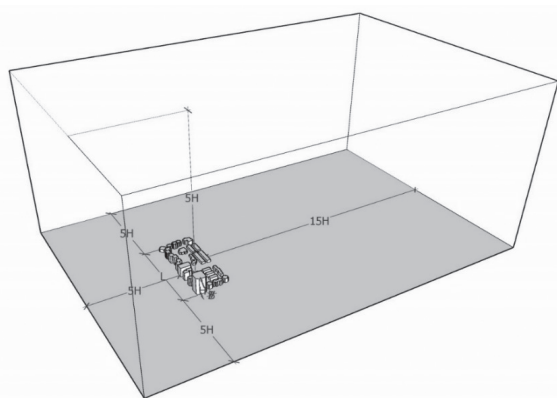


Рис. 2. Домен расчета

Fig. 2. Computational domain

Режим расчета

Моделирование вычислительного гидродинамического анализа CFD классифицируется на три категории на основе следующих режимов расчета:

- прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation — DNS);

- моделирование больших вихрей (Large eddy Simulation — LES);

- Рейнольдс усредненное моделирование Навье — Стокса (RANS).

Теоретически метод DNS может правильно имитировать поле потока, но требуются все вихревые токи. Метод LES может вычислять большой и маленький вихри, но не может работать на одной маленькой платформе. Поэтому мы использовали метод RANS для расчета глобального среднего значения с помощью широко используемой модели турбулентности $k-\epsilon$.

Из-за его почти бесконечного вихревого движения и нелинейной математики турбулентное движение очень затруднено. В результате при создании связанной модели микрокосмическая модель, которая учитывает вихревую вязкость и напряжение Рейнольдса, устанавливается в трехмерном пространстве на основе среднего свойства. Модель можно разделить по количеству дифференциальных уравнений: ноль, одно уравнение, два уравнения и модель с несколькими уравнениями. Модель турбулентности $k-\epsilon$, предложенная Launder и Spalding в 1972 г., получена из большого числа экспериментальных выводов типичных двух уравнений, что означает, что модель состоит из двух основных переменных уравнений (турбулентной кинетической энергии и скорости потребления энергии) с широким диапазоном применения.

Fluent code позволяет рассчитать чистую радиационную настройку солнечной модели, которая основана на положении на поверхности Земли (широта и долгота), ориентации модели по отношению к северу, времени суток, времени года и установленным условиям для ясной или облачной погоды.

Табл. 1. Данные климата настройки в территории исследования

Table 1. Climate data valid for the area of research

Время / Time of day	Средняя температура, °C / Average temperature, °C	Средняя температура, K / Average temperature, K	Средняя скорость ветра, м/с / Average wind velocity, m/s	Солнечная радиация, W/m ² / Solar radiation, W/m ²
5–6	26,31	299,46	2,118	1,2
10–11	27,73	300,88	1,104	37,35
12–13	28,03	301,03	1,392	50,89

В качестве решателя использован алгоритм на основе давления «Простой», который использует связь между скоростью и коррекцией давления для обеспечения сохранения массы и получения поля давления.

Однако в исследованиях улицы и термической стратификации наиболее часто используется стандартная модель турбулентности k – ε .

При моделировании вычислительного гидродинамического анализа CFD были установлены различные настройки параметров для уточнения корреляции между уличной средой и тепловым комфортом. В этом исследовании начальная температура эталонного поля взята из средних температур, собранных на четырех станциях теплового комфорта в течение дня, а начальная скорость ветра измерена станцией теплового комфорта в течение четырех периодов (табл. 1).

Из лабораторных и метеорологических исследований известно, что в нижней части турбулентного пограничного слоя напряжение трения мало отличается от приземного трения [26, 27]. Это приводит к логарифмическому закону изменения скорости ветра с высотой:

$$U_*(z) = U_1 / \ln(Z_1 / Z_*), \quad (5)$$

где $Z_* < Z < 0,3 \delta$; U_1 — скорость ветрового потока на высоте Z_1 , м/с; Z_* — параметр, служащий характеристикой размера вихрей вблизи поверхности земли, в пригородах со сплошной невысокой застройкой $Z_* = 0,8$ – $1,2$ м, в крупных городах $Z_* = 2$ – 3 м [26].

Более известен исторически первый степенной закон изменения средней скорости ветра по всей толщине $0 < Z < \delta$ атмосферного пограничного слоя. Многочисленные разновидности этого закона [26, 28–30]:

$$U_*(Z) = (Z / Z_0)^\alpha, \quad (6)$$

где U_0 — средняя скорость ветрового потока на высоте Z_0 , м/с, а показатель степени α зависит от типа местности и может изменяться в диапазоне $0,14$ – $0,4$ (в работах [26, 29] рекомендуется $\alpha = 0,22$ – $0,28$ для пригородов; $\alpha = 0,33$ – $0,4$ — для крупных городов).

В дополнение к профилю скорости на граничных поверхностях входа были определены профили турбулентной кинетической энергии k и скорости

диссипации турбулентности ε , чтобы начать итеративные вычисления:

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \left(1 - \frac{z}{\delta} \right); \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{k(z + z_0)} \left(1 - \frac{z}{\delta} \right). \quad (8)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Состояние уличной термальной среды в разные периоды времени

Нами проведено моделирование вычислительного гидродинамического анализа CFD городской уличной термальной среды для трех разных периодов времени (рис. 3–5). Основные переменные зависят от температуры фона и скорости ветра.

Результаты моделирования показывают, что высокие температуры в основном сосредоточены на юго-востоке области исследования. Основная причина для юго-восточной части исследуемой территории состоит в том, что условия рассеивания тепла в большой локальной зоне здания и вентиляционные охлаждения плохие. Кроме того, в средней части исследуемой площади здания относительно редки (тепловыделение в зданиях ниже), а эффект охлаждения вентиляцией выше, что приводит к низкой температуре.

Результаты моделирования в три различные периоды времени показывают, что, хотя фоновая температура в 10 и 13 часов выше, чем в 6 часов утра, скорость ветра в эти два периода ниже, чем в 6 утра (табл. 2). Таким образом, результаты моделирования показывают, что некоторые районы имеют высокие температурные условия. В моделировании вычислительного гидродинамического анализа CFD условие скорости фоновых ветров является важным фактором, который определяет результаты моделирования тепловой среды.

Табл. 2. Данные температуры на территории моделирования

Table 2. Temperature data for the simulation area

6:00		10:00		13:00	
$T_{\min}, ^\circ\text{C}$	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	$T_{\min}, ^\circ\text{C}$	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	$T_{\min}, ^\circ\text{C}$	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$
20,87	26,29	21,74	28,42	22,17	29,33

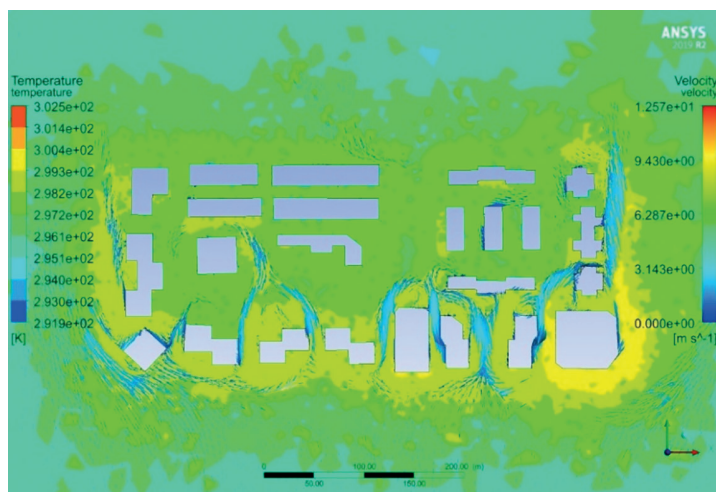


Рис. 3. Результат моделирования температуры поверхности в 5:00–6:00

Fig. 3. Surface temperature simulation at 5:00–6:00 a.m.

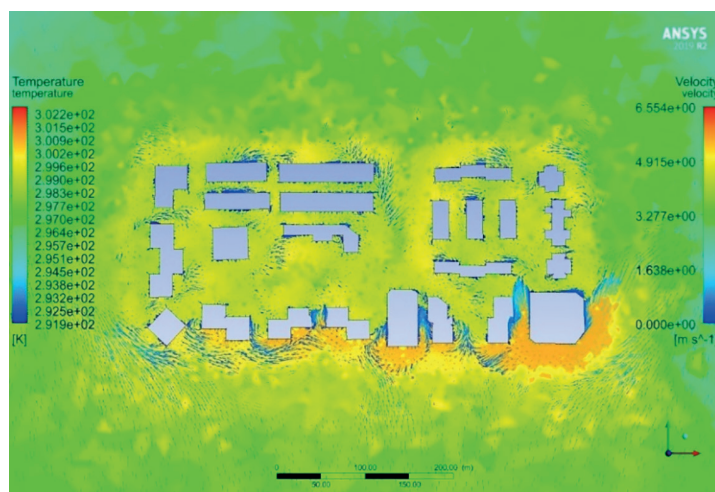


Рис. 4. Результат моделирования температуры поверхности в 10:00–11:00

Fig. 4. Surface temperature simulation at 10:00–11:00 a.m.

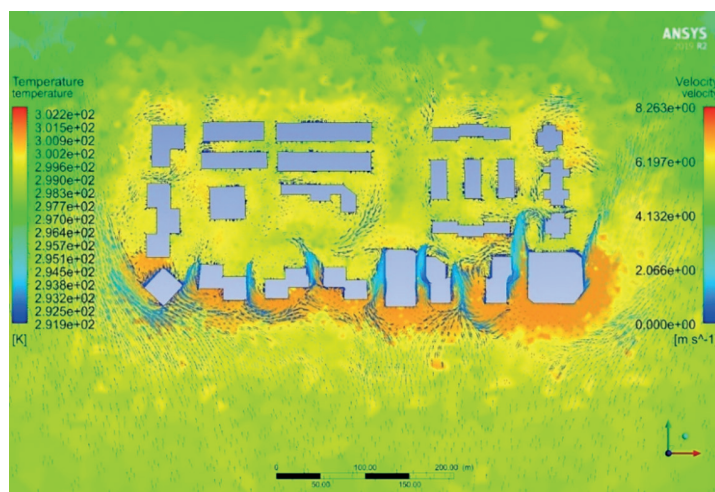


Рис. 5. Результат моделирования температуры поверхности в 12:00–13:00

Fig. 5. Surface temperature simulation at 12:00 p.m.–1:00 p.m.

Моделирование различного тепловыделения здания

Различные результаты моделирования тепло-выделения здания (рис. 6–8) показывают, что по мере увеличения тепловыделения здания общая температура исследуемой области также постепенно увеличивается и, соответственно, увеличивается диапазон разности температур всей области.

Когда теплоотдача здания увеличилась, общая разность температур в исследуемой области увеличилась, что указывает на то, что, хотя температура в области низких температур также увеличилась лишь незначительно, область высокой температуры накапливалась из-за тепла, что приводило к разнице температур в других областях. Это изменение серьезно ухудшит тепловую среду городских улиц и тепловой комфорт, и его влияние нельзя недооценивать.

Результаты моделирования показывают, что, если здание может эффективно контролировать рассеивание тепла в здании, оно может потенциально поддерживать тепловую среду городских улиц в определенном состоянии теплового комфорта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Во Вьетнаме большинство людей живет в городах, поэтому городская уличная тепловая среда и тепловой комфорт оказывают значительное влияние на качество их жизни. Кондиционирование воздуха, потребление энергии и мероприятия на свежем воздухе составляют важную часть этого качества. Чтобы пронаблюдать взаимосвязь между городской уличной средой и тепловым комфортом в г. Ханое, это исследование было основано на мобильной

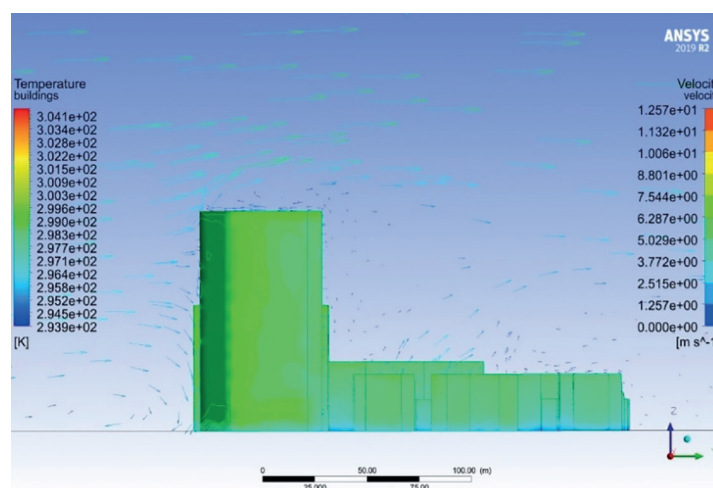


Рис. 6. Результат моделирования здания искусственным теплом в 5:00–6:00

Fig. 6. Building simulation using artificial heat at 5:00 a.m.–6:00 a.m.

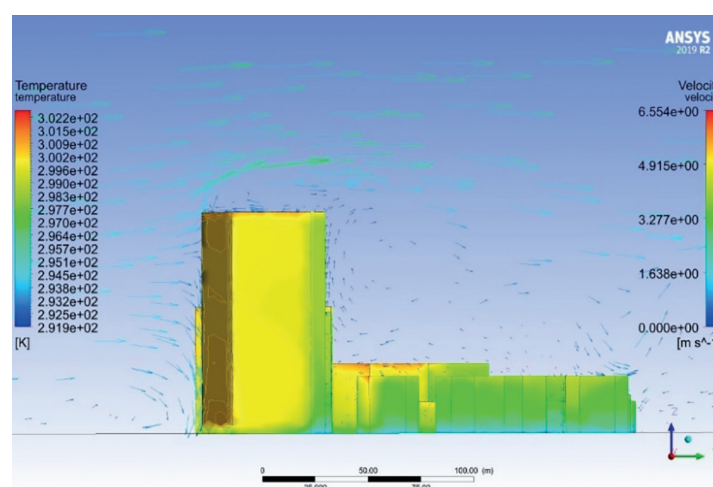


Рис. 7. Результат моделирования здания искусственным теплом в 10:00–11:00

Fig. 7. Building simulation using artificial heat at 10:00 a.m.–11:00 a.m.

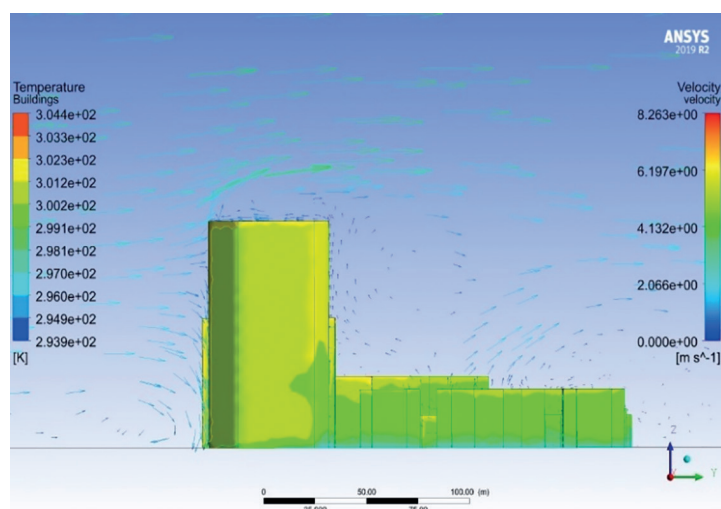


Рис. 8. Результат моделирования здания искусственным теплом в 12:00–13:00

Fig. 8. Building simulation using artificial heat at 12:00 p.m.–13:00 p.m.

станции мониторинга окружающей среды. Для определения изменения микроклиматических данных и моделирования тепловой среды городских улиц использовался вычислительный гидродинамический анализ CFD. Городская уличная среда и сфера деятельности людей могут улучшить тепловой комфорт.

- наиболее высокие температуры наблюдались вокруг юго-восточной стороны зданий. Таким образом, снижение плотности застройки и сохранение расстояния между зданиями будет способствовать движению ветра и охлаждению городских улиц;
- следует различать следующие периоды времени: 5:00–6:00, 10:00–11:00 и 12:00–13:00. Тенденция заключается в том, что «фоновая температура ниже,

а результаты моделирования прохладнее». Показано, что фоновая температура по-прежнему является наиболее важным фактором, влияющим на результаты моделирования CFD, поэтому управление тепловыделением городских зданий, чтобы избежать выхода тепла из здания на улицы для поддержания высокотемпературного состояния, может улучшить комфорт городской уличной тепловой среды как стратегическое направление для улучшения;

- наибольший вклад в работу вносит использование микрометеостанции. Для улучшения теплового комфорта улиц можно рекомендовать анализ оценки окружающих зданий, озеленение и теневые участки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sun C.-Y. A street thermal environment study in summer by the mobile transect technique // *Theoretical and Applied Climatology*. 2011. Vol. 106. Issue 3–4. Pp. 433–442. DOI: 10.1007/s00704-011-0444-6
2. Sun C.-Y., Brazel A.J., Chow W.T., Hedquist B.C., Prasad L. Desert heat island study in winter by mobile transect and remote sensing techniques // *Theoretical and Applied Climatology*. 2009. Vol. 98. Issue 3–4. Pp. 323–335. DOI: 10.1007/s00704-009-0120-2
3. Yuan F., Bauer M.E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in landsat imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol. 106. Issue 3. Pp. 375–386. DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.003
4. Gagliano A., Patania F., Capizzi A., Nocera F., Galesi A. A proposed methodology for estimating the performance of small wind turbines in urban areas // *Sustainability in Energy and Buildings*. 2012. Pp. 539–548. DOI: 10.1007/978-3-642-27509-8_45
5. Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J., Hensen J. Application of computational fluid dynamics in building performance simulation for the outdoor environment: an overview // *Journal of Building Performance Simulation*. 2011. Vol. 4. Issue 2. Pp. 157–184. DOI: 10.1080/19401493.2010.513740
6. Ramponi R., Blocken B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters // *Building and Environment*. 2012. Vol. 53. Pp. 34–48. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.01.004

7. Алексашина В.В., Ле Минь Туан. Влияние эффекта острова тепла на экологию мегаполиса // Проблемы региональной экологии. 2018. № 5. С. 36–40. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-15036
8. Gagliano A., Detommaso M., Nocera F., Patania F., Aneli S. The Retrofit of Existing Buildings Through the Exploitation of the Green Roofs — A Simulation Study // Energy Procedia. 2014. Vol. 62. Pp. 52–61. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.12.366
9. Minh Tuan Le, Nguyen Anh Quan Tran. Features of the formation of urban heat islands effects in tropical climates and their impact on the ecology of the city // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 91. P. 05005. DOI: 10.1051/e3sconf/20199105005
10. Mochida A., Lun I.Y.F. Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2008. Vol. 96. Issue 10–11. P. 1498–1527. DOI: 10.1016/j.jweia.2008.02.033
11. Ле Минь Туан. Влияние планировки города на возникновение островов тепла в мегаполисах с тропическим климатом (г. Ханой) // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 2 (125). С. 148–157. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.148-157
12. Santamouris M., Synnefa A., Karlessi T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions // Solar Energy. 2011. Vol. 85. Issue 12. Pp. 3085–3102. DOI: 10.1016/j.solener.2010.12.023
13. Yuan J., Emura K., Sakai H. Evaluation of the solar reflectance of highly reflective roofing sheets installed on building roofs // Journal of Building Physics. 2013. Vol. 37. Issue 2. Pp. 170–184. DOI: 10.1177/1744259112459263
14. Yamashita S., Sekine K., Shoda M., Yamashita K., Hara Y. On relationships between heat island and sky view factor in the cities of tama river basin, Japan // Atmospheric Environment (1967). 1986. Vol. 20. Issue 4. Pp. 681–686. DOI: 10.1016/0004-6981(86)90182-4
15. Minh Tuan Le, Thi Anh Tuyet Cao, Nguyen Anh Quan Tran. The role of green space in the urbanization of Hanoi city // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701013
16. Jonsson P. Vegetation as an Urban Climate Control in the Subtropical City of Gaborone, Botswana // International Journal of Climatology. 2004. Vol. 24. Issue 10. Pp. 1307–1322. DOI: 10.1002/joc.1064
17. Oliveira Pano M.J.N., Goncalves H.J., Ferrao P.M.C. Numerical analysis of the street canyon thermal conductance to improve urban design and climate // Building and Environment. 2009. Vol. 44. Issue 1. Pp. 177–187. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.02.004
18. Sini J.F., Anquetini S., Mestayer P. Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons // Atmospheric Environment. 1996. Vol. 30. Issue 15. Pp. 2659–2677. DOI: 10.1016/1352-2310(95)00321-5
19. Offerle B., Eliasson I., Grimmond C.S.B., Holmer B. Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon // Boundary-Layer Meteorology. 2007. Vol. 122. Issue 2. Pp. 273–292. DOI: 10.1007/s10546-006-9099-8
20. Xie X., Huang Z., Wang J., Xie Z. Thermal effects on vehicle emission dispersion in an urban street canyon // Transportation Research Part D. 2005. Vol. 10. Issue 3. Pp. 197–212. DOI: 10.1016/j.trd.2005.01.002
21. Oke T.R. Boundary Layer Climates. London and New York : Routledge, 1987.
22. Nakamura Y., Oke T.R. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon // Atmospheric Environment (1967). 1988. Vol. 22. Issue 12. Pp. 2691–2700. DOI: 10.1016/0004-6981(88)90437-4
23. Santamouris M., Papanikolaou N., Koronakis I., Livada I., Assimakopoulos D. Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions // Atmospheric Environment. 1999. Vol. 33. Issue 27. Pp. 4503–4521. DOI: 10.1016/s1352-2310(99)00187-9
24. 23. ANSYS Fluent Theory, Guide. URL: https://uiuc-cse.github.io/me498cm_fa15/lessons/fluent/refs/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide.pdf
25. 24. Bakker A., Oshinowo L. Modelling of Turbulence in Stirred Vessels Using Large Eddy Simulation // Chemical Engineering Research and Design. 2004. Vol. 82. Issue 9. Pp. 1169–1178. DOI: 10.1205/cerd.82.9.1169.44153
26. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М. : Стройиздат, 1984. 358 с.
27. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М. : Наука, 1974.
28. Табунчиков Ю.А., Шилкин Н.В. Аэродинамика высотных зданий // АВОК. 2004. № 8.
29. Старков А.Н., Безруких П.П., Ландберг Л., Борисенко М.М. Атлас ветров России. Изд-во Можайск-Терра, 2000.
30. Magee N., Curtis J., Wendler G. The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska // Theoretical and Applied Climatology. 1999. Vol. 64. Issue 1. Pp. 39–47. DOI: 10.1007/s007040050109

Поступила в редакцию 18 октября 2019 г.

Принята в доработанном виде 8 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 27 февраля 2020 г.

О Б АВТОРАХ: Ле Минь Туан — аспирант кафедры архитектуры; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; grado@mgsu.ru;

Илхомжон Садриевич Шукуров — доктор технических наук, профессор кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; grado@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Sun C.-Y. A Street Thermal Environment Study in Summer by the Mobile Transect Technique. *Theoretical and Applied Climatology*. 2011; 106(3-4):433-442. DOI: 10.1007/s00704-011-0444-6
2. Sun C.-Y., Brazel A.J., Chow W.T., Hedquist B. C., Prashad L. Desert Heat Island Study in Winter by Mobile Transect and Remote Sensing Techniques. *Theoretical and Applied Climatology*. 2009; 98(3-4):323-335. DOI: 10.1007/s00704-009-0120-2
3. Yuan F., Bauer M.E. Comparison of Impervious Surface Area and Normalized Difference Vegetation Index as Indicators of Surface Urban Heat Island Effects in Landsat Imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2007; 106(3):375-386. DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.003
4. Gagliano A., Patania F., Capizzi A., Nocera F., Galesi A. A proposed methodology for estimating the performance of small wind turbines in urban areas. *Sustainability in Energy and Buildings*, 2012; 539-548. DOI: 10.1007/978-3-642-27509-8_45
5. Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J., Hensen J. Application of computational fluid dynamics in building performance simulation for the outdoor environment: an overview. *Journal of Building Performance Simulation*. 2011; 4(2):157-184. DOI: 10.1080/19401493.2010.513740
6. Ramponi R., Blocken B. CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters. *Building and Environment*. 2012; 53:34-48. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.01.004
7. Aleksashina V.V., Le Minh Tuan. Influence of the urban heat island effects on the ecology of the megacity. *Regional Environmental Issues*. 2018; 5:36-40. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-15036 (rus.).
8. Gagliano A., Detommaso M., Nocera F., Patania F., Aneli S. The Retrofit of Existing Buildings Through the Exploitation of the Green Roofs – A Simulation Study. *Energy Procedia*. 2014; 62:52-61. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.12.366
9. Minh Tuan Le, Nguyen Anh Quan Tran. Features of the formation of urban heat islands effects in tropical climates and their impact on the ecology of the city. *E3S Web of Conferences*. 2019; 91:05005. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199105005
10. Mochida A., Lun I.Y.F. Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008; 96:10-11:1498-1527. DOI: 10.1016/j.jweia.2008.02.033
11. Le Minh Tuan. The influence of city planning on the emergence of heat islands in megacities with a tropical climate (Hanoi). *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14(2)(125):148-157. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.148-157 (rus.).
12. Santamouris M., Synnefa A., Karlessi T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*. 2011; 85(12):3085-3102. DOI: 10.1016/j.solener.2010.12.023
13. Yuan J., Emura K., Sakai H. Evaluation of the solar reflectance of highly reflective roofing sheets installed on building roofs. *Journal of Building Physics*. 2013; 37(2):170-184. DOI: 10.1177/1744259112459263
14. Yamashita S., Sekine K., Shoda M., Yamashita K., Hara Y. On Relationships between Heat Island and Sky View Factor in the Cities of Tama River Basin, Japan. *Atmospheric Environment* (1967). 1986; 20(4):681-686. DOI: 10.1016/0004-6981(86)90182-4
15. Minh Tuan Le, Thi Anh Tuyet Cao, Nguyen Anh Quan Tran. The role of green space in the urbanization of Hanoi city. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:01013. DOI: 10.1051/e3sconf/20199701013
16. Jonsson P. Vegetation as an Urban Climate Control in the Subtropical City of Gaborone, Botswana. *International Journal of Climatology*. 2004; 24(10):1307-1322. DOI: 10.1002/joc.1064
17. Oliveira Pano M.J.N., Goncalves H.J., Ferrao P.M.C. Numerical analysis of the street canyon thermal conductance to improve urban design and climate. *Building and Environment*. 2009; 44(1):177-187. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.02.004
18. Sini J.F., Anquetini S., Mestayer P. Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmospheric Environment*. 1996; 30(15):2659-2677. DOI: 10.1016/1352-2310(95)00321-5
19. Offerle B., Eliasson I., Grimmond C.S.B., Holmer B. Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon. *Boundary-Layer Meteorology*. 2007; 122(2):273-292. DOI: 10.1007/s10546-006-9099-8
20. Xie X., Huang Z., Wang J., Xie Z. Thermal effects on vehicle emission dispersion in an urban

street canyon. *Transportation Research Part D*. 2005; 10(3):197-212. DOI: 10.1016/j.trd.2005.01.002

21. Oke T.R. *Boundary Layer Climates*. London and New York, Routledge, 1987.

22. Nakamura Y., Oke T.R. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment* (1967). 1988; 22(12):2691-2700. DOI: 10.1016/0004-6981(88)90437-4

23. Santamouris M., Papanikolaou N., Koronakis I., Livada I., Assimakopoulos D. Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. *Atmospheric Environment*. 1999; 33(27):4503-4521. DOI: 10.1016/s1352-2310(99)00187-9

24. *ANSYS Fluent Theory, Guide*. URL: https://uiuc-cse.github.io/me498cm_fa15/lessons/fluent/refs/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide.pdf

25. Bakker A., Oshinowo L. Modelling of Turbulence in Stirred Vessels Using Large Eddy Simulation. *Chemical Engineering Research and Design*. 2004; 82(9):1169-1178. DOI: 10.1205/cerd.82.9.1169.44153

26. Simiu E., Skanlan R. *The impact of wind on buildings and structures*. Moscow, Stroyizdat, 1984; 358. (rus.).

27. Shlikhting G. *Boundary layer theory*. Moscow, Nauka, 1974. (rus.).

28. Tabunshchikov Yu.A., Shilkin N.V. Aerodynamics of high-rise buildings. *AVOK*. 2004; 8. (rus.).

29. Starkov A.N., Bezrukikh P.P., Landberg L., Borisenko M.M. *Atlas of winds of Russia*. Izdvo Mozhaysk-Terra, 2000. (rus.).

30. Magee N., Curtis J., Wendler G. The Urban Heat Island Effect at Fairbanks, Alaska. *Theoretical and Applied Climatology*. 1999; 64(1):39-47. DOI: 10.1007/s007040050109

Received October 18, 2019.

Adopted in a revised form on November 8, 2019.

Approved for publication February 27, 2020.

BIONOTES: **Le Minh Tuan** — postgraduate student of Department of Architecture; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; grado@mgsu.ru;

Ilkhomzhon S. Shukurov — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Urban planning, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; grado@mgsu.ru.

Проблема температурного трещинообразования в бетонных гравитационных плотинах

Н.А. Анискин, Нгуен Чонг Чык

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Бетонирование массивных сооружений, таких как бетонные плотины, мостовые конструкции, фундаменты зданий и сооружений, сопровождается явлением экзотермического разогрева конструкции, вызванного процессом гидратации цемента. Выделяемое в массивных бетонных блоках тепло в естественных условиях медленно отводится из конструкции. Часто между центральной частью массива и его поверхностью возникает значительный температурный перепад. В случае достижения критической величины температурного перепада возникают температурные трещины, нарушающие монолитность конструкции. Для предварительной оценки возможности трещинообразования и выработки мер по его исключению необходимо решение температурной задачи и задачи по определению термонапряженного состояния конструкции. Эта проблема давно находится в центре внимания специалистов и ей посвящено большое количество исследований.

Материалы и методы. Обзор основан на сборе информации о материалах проведенных ранее исследований по вопросу температурного трещинообразования массивных бетонных плотин и методах его устранения. С использованием численного моделирования предложена математическая модель по прогнозу и оценке возможного трещинообразования возводимого бетонного массива.

Результаты. Проведен обзор современных подходов к оценке возможного образования температурных трещин, современных методов решения задач и некоторые результаты исследований в этом направлении, выполненные на основе метода конечных элементов. Предложена методика прогноза температурного режима и термонапряженного состояния возводимого бетонного массива и оценка возникновения температурных трещин.

Выводы. Проблема температурного трещинообразования в настоящее время до конца не решена. Предлагаемая методика и прогнозная численная модель может быть полезна в качестве ориентира для инженеров при проектировании и строительстве гравитационных бетонных плотин. С ее помощью возможно снизить вероятность образования трещин вследствие экзотермии цемента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: температурный режим, термонапряженное состояние, трещинообразование, бетонные гравитационные плотины, низкотермичный цемент, охлаждение бетона, поверхностная изоляция, трубное охлаждение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Анискин Н.А., Нгуен Чонг Чык. Проблема температурного трещинообразования в бетонных гравитационных плотинах // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 3. С. 380–398. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.380-398

The problem of temperature cracking in concrete gravity dams

Nikolay A. Aniskin, Nguyen Trong Chuc

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

ABSTRACT

Introduction. The concreting of solid structures, such as concrete dams, bridge constructions, foundations of buildings and structures, is accompanied by exothermic heating, caused by cement hydration. Heat, emitted by mass concrete blocks, slowly leaves constructions. A substantial temperature difference frequently arises between the solid concrete centre and its surface. If this temperature difference reaches a critical value, thermal cracking occurs, which destroys structural continuity. Temperature problems and those associated with thermal stress state should be resolved to pre-assess and prevent potential cracking. This problem has enjoyed the attention of specialists, and it has been the subject of numerous research projects.

Materials and methods. The overview is based on the information about implemented research projects focused on the thermal cracking of mass concrete dams and its prevention. Computer modeling techniques were applied to develop a mathematical model capable of projecting and assessing the potential cracking of mass concrete.

Results. The co-authors have compiled an overview of advanced approaches to the assessment of potential thermal crack formation, contemporary problem-solving methods and selected research findings obtained using the finite element method. The co-authors offer a thermal behaviour/thermal stress state projection methodology for solid concrete, as well as a thermal crack formation assessment methodology.

Conclusions. The thermal cracking problem has not been solved yet. The proposed methodology and a projection-oriented numerical model can be used as a reference by civil engineers in the process of designing and constructing concrete gravity dams. It may help to reduce cracking probability caused by heat evolution in cement.

KEYWORDS: thermal mode, thermal stress state, cracking, concrete gravity dams, low heat, concrete cooling, surface insulation, tubular cooling

FOR CITATION: Aniskin N.A., Nguyen Trong Chuc. The problem of temperature cracking in concrete gravity dams. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(3):380-398. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.380-398 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Бетонные гравитационные плотины — один из самых распространенных типов водонапорных сооружений, нашедших широкое применение как в России, так и в мире. При их возведении основным являются температурные воздействия на сооружение [1–3]. В результате тепловыделения при гидратации цемента и влияния множества факторов возможно возникновение значительных температурных градиентов и появление трещин¹ [4–6]. Одно из мероприятий по снижению нагрева сооружения в процессе строительства и уменьшения риска возникновения температурных трещин — уменьшение расхода цемента [6–9], это ключевое преимущество плотин из укатанного бетона. Однако и для таких сооружений проблема температурного трещинообразования стоит весьма остро [10–12]. Для регулирования температурного режима и достижения желаемого результата применяют различные меры [13]. При проектировании сооружения необходима предварительная оценка возможного температурного режима и его термонапряженного состояния.

Проблема борьбы с температурным трещинообразованием возникла одновременно с началом строительства массивных бетонных плотин. По мере накопления опыта строительства вырабатывались мероприятия по исключению трещинообразования или снижению их уровня и исключению опасных трещин. В настоящее время эта проблема не решена до конца. За последние годы трещинообразование наблюдается в большинстве современных плотин [14–18].

Тепло, выделяющееся в процессе гидратации цемента, вызывает на первом этапе сжимающие напряжения в бетонной плотине. Затем за счет понижения температуры происходит усадка бетона и возникновение растягивающих напряжений. Когда растягивающие напряжения превышают прочность бетона на растяжение, образуются трещины. Трещинообразование снижает несущую способность

сооружения, приводит к увеличению фильтрационного потока через сооружение, вызывая выщелачивание материала. Поэтому при возведении бетонной плотины следует контролировать температуру в бетонном блоке, чтобы ограничить трещинообразование [19–21].

Температурное трещинообразование при строительстве массивных бетонных плотин и его причины

Возведение массивных бетонных плотин практически всегда сопровождается трещинообразованием вследствие гидратации цемента. На основе анализа натурных наблюдений было предложено несколько классификаций строительных температурных трещин. Например, по местоположению трещины можно подразделять на поверхностные и внутренние [22–24].

Образование поверхностных трещин бетона объясняется перепадом температур наружной среды и внутренней зоны бетонного блока. Скорость распространения наружу внутреннего тепла, образующегося за счет гидратации цемента, медленнее, чем скорость отдачи окружающей среде температуры на поверхности бетонного блока. Это приводит к тому, что поверхность бетонного блока сжимается, а внутренняя часть бетонного блока расширяется, в результате чего образуются трещины. При этом внутри бетонного блока возникает сжимающее напряжение, на поверхности — растягивающее напряжение. Если растягивающее напряжение на поверхности бетонного блока превышает прочность бетона на растяжение, то образуются трещины. Это явление начинается, как правило, через одну-две недели после бетонирования. Образующиеся на поверхности бетона трещины часто короткие, неглубокие и не имеют четкого направления (рис. 1, 2) [25–27].

Трещины в контактной зоне появляются на контактной поверхности между слоем нового бетона и основания (или старым слоем бетона). Термонапряжения образуются из-за перепада температур между слоем нового бетона и основанием. Если растягивающее напряжение больше допустимого растягивающего напряжения, образуются трещи-

¹ СП 317.1325800.2017. Конструкции бетонные гидротехнических сооружений, правила производства и приемки работ. М., 2017. 77 с.



Рис. 1. Температурные трещины на поверхности бетона

Fig. 1. Temperature cracks on concrete surface

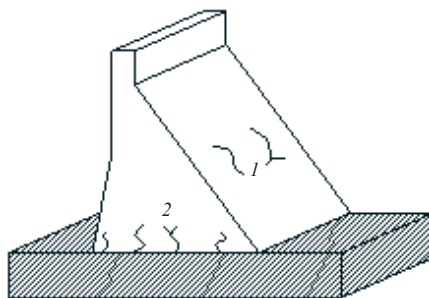
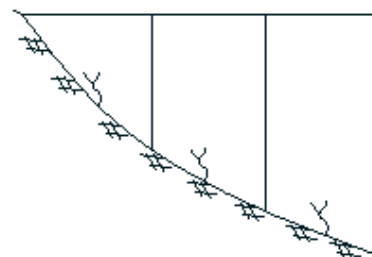


Рис. 2. Воздействие температуры на работу бетонных сооружений: 1 — трещины на поверхности бетона; 2 — трещины в контактной зоне

Fig. 2. The effect of temperature on the operation of concrete structures: 1 — cracks on concrete surface; 2 — cracks in the contact zone



ны. В этом случае трещины могут быть сквозными. Сквозные трещины вредят безопасности сооружения, они снижают несущую способность и водонепроницаемость бетона. Обычно длина трещин составляет 1–3 м, трещины, как правило, расположены перпендикулярно основанию (рис. 2). Обнаружить такие трещины очень сложно, они часто проявляются при эксплуатации сооружения [25–27].

В зависимости от причин возникновения трещин предложена следующая классификация [28]:

- трещины в неперекрытом блоке, возникающие в результате интенсивного остывания открытых поверхностей бетонного блока (при зимнем бетонировании) или интенсивного экзотермического разогрева внутри блока (при летнем бетонировании);
- трещины, связанные с перекрытием блока, которое может вызвать большой температурный перепад между ранее уложенным бетоном (уже остывшим) и вновь уложенным (в котором происходит интенсивное тепловыделение);
- трещины, вызванные высоким темпом бетонирования, которое может вызвать неравномерность температурного поля в горизонтальном направлении: при увеличенном интервале в укладке смежных блоков периферийные зоны у боковых поверхностей остывают, а в центральных зонах продолжается повышение температуры;
- трещины в массиве старого бетона, вызванные разницей температуры внутри старого массива (уже остывшего) и нагретой внешним температурным воздействием боковой поверхностью блока.

В последние годы произошел резкий скачок в совершенствовании технологии возведения массивных бетонных плотин и используемых материалов. Наибольшее распространение получили плотины из укатанного бетона, технология возведения которых предполагает использование жестких бетонных смесей с низким содержанием цемента. Содержание цемента колеблется в достаточно широких пределах от 150 кг/м³ до 50 кг/м³ в плотинах из «особо тощего малоцементного бетона» [29]. Возможные

конструктивные решения современных гравитационных плотин представлены на рис. 3. Несмотря на гораздо меньшее количество тепла, выделяемого в процессе гидратации цемента в таких конструкциях, проблема температурного трещинообразования для них также остается весьма актуальной [30].

Как показывает практика строительства массивных бетонных плотин [31], в зависимости от условий «защемления» и расположения блока в теле плотины (рис. 4) возникновение температурных трещин связано с температурными перепадами:

- для блоков в зоне «защемления» (рис. 4, *b*), расположенных вблизи основания плотины (зона высотой примерно равной длине блока $l_{\text{бл}}$), основной причиной трещинообразования является перепад между осредненной температурой в блоке в период экзотермии и осредненной температурой в блоке в период эксплуатации ΔT_2 (рис. 4, *b*);
- для блоков в «свободной» зоне (рис. 4, *a*) определяющим является перепад между температурой в центре блока и на его наружной поверхности ΔT_1 (рис. 4, *a*).

В настоящее время при укладке бетона ограничивают возможный перепад температур ΔT между поверхностью и центральной зоной сооружения. Достаточно часто такой перепад принимается равным 20 °С независимо от зоны сооружения и вида бетона [33]. Ряд российских нормативных документов [34] несколько разделяют требования к температурному перепаду. Так, например, в соответствии с [35] в контактной зоне перепад ΔT должен быть не более 16–18 °С при бетонировании длинными блоками и 20–27 °С при использовании столбчатой разрезки. Под контактной зоной подразумевается зона сооружения у основания высотой, равной 0,2 наибольшего размера блока в плане. В контактной зоне не допускается переохлаждение бетона ниже расчетных низших температур. Для бетона свободной области величина разности температур между ядром и боковыми поверхностями массива ΔT допускается не более 20–25 °С.

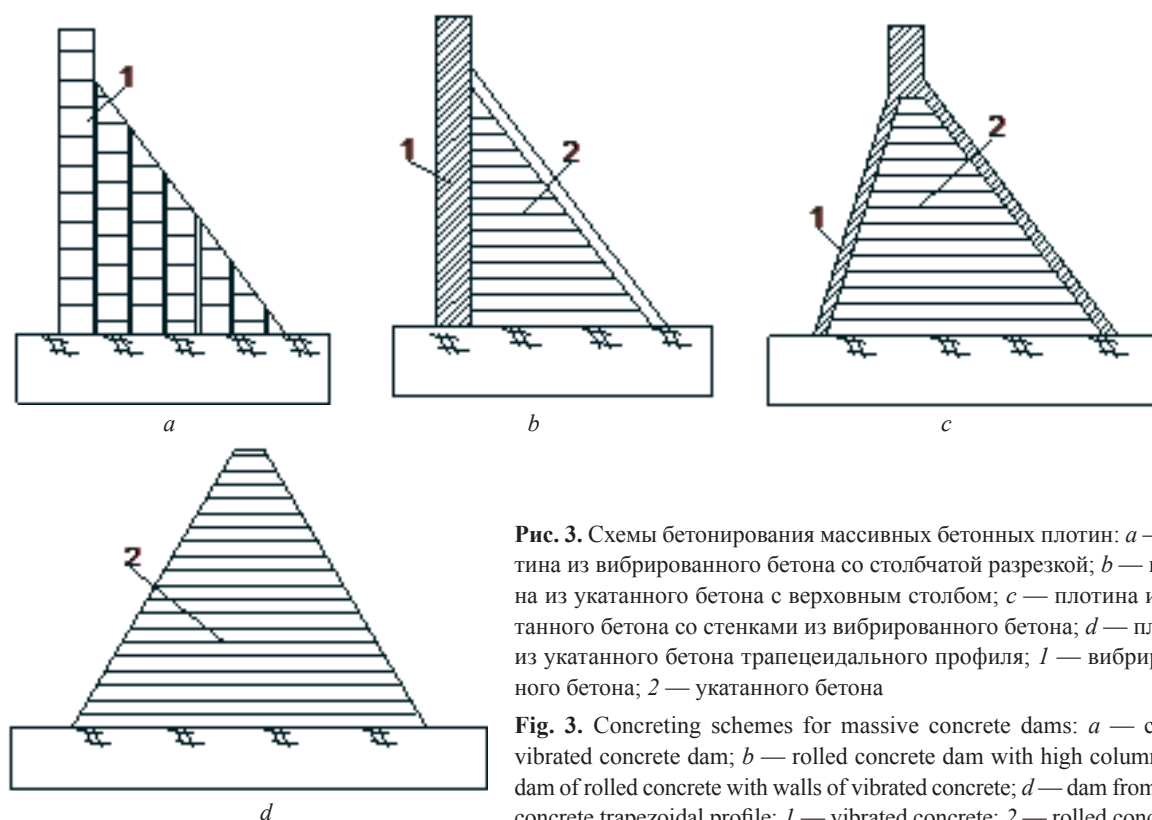


Рис. 3. Схемы бетонирования массивных бетонных плотин: *a* — плотина из вибрированного бетона со столбчатой разрезкой; *b* — плотина из укатанного бетона с верховным столбом; *c* — плотина из укатанного бетона со стенками из вибрированного бетона; *d* — плотина из укатанного бетона трапециевидального профиля; 1 — вибрированного бетона; 2 — укатанного бетона

Fig. 3. Concreting schemes for massive concrete dams: *a* — column vibrated concrete dam; *b* — rolled concrete dam with high column; *c* — dam of rolled concrete with walls of vibrated concrete; *d* — dam from rolled concrete trapezoidal profile: 1 — vibrated concrete; 2 — rolled concrete

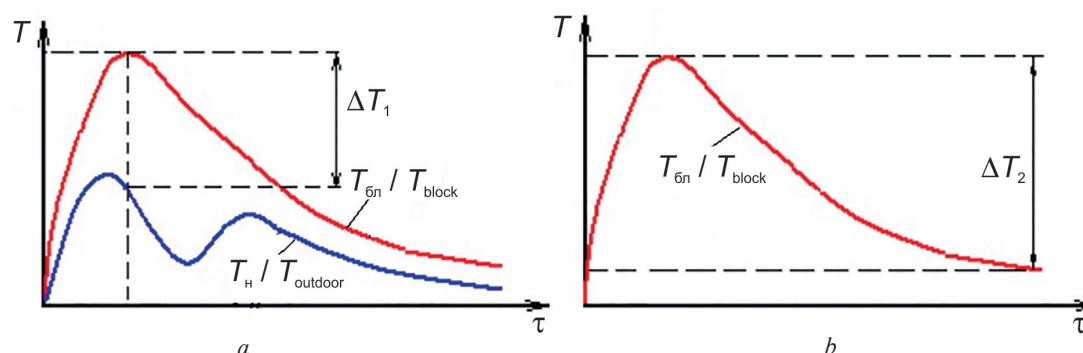


Рис. 4. Графики изменения температур и температурных перепадов в бетонном массиве: *a* — график изменения температур в блоке и опасный температурный перепад в свободной зоне; *b* — график изменения температур в блоке и опасный температурный перепад в контактной зоне [32]

Fig. 4. The graphs of temperature changes and temperature drop in the concrete mass: *a* — graph of temperature changes in the block and a dangerous temperature drop in the free zone; *b* — graph of temperature changes in the block and a dangerous temperature drop in the contact zone [32]

Аналогичные требования к температурному режиму возводимого бетонного массива предъявляются и в международной практике строительства. Так, во Вьетнаме, согласно стандарту TCVN 305.2004 «Массивный бетон — правила практики строительства и приемки», необходимо контролировать два фактора, влияющие на появление трещин в бетонном блоке. Первый фактор — перепад температуры между центром массива и его поверхностью ΔT . Для того чтобы избежать появления трещин, требуется следующее условие: $\Delta T < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Второй фактор — температурный градиент, величина которого должна быть $M_T \leq 50\text{ }^{\circ}\text{C/м}$ [36].

Приведенные выше требования по температурному перепаду сформированы на основе практики бетонирования и не всегда учитывают нюансы процесса. Допустимые максимальная температура и максимальная разница температур в массовых бетонных конструкциях часто прогнозируются перед укладкой бетона для конкретных проектов². Согласно исследованиям [37, 38], допустимая максимальная температура в бетонных блоках может

² СП 357.1325800.2017. Конструкции бетонные гидротехнических сооружений. Правила производства и приемки работ», Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. М., 2016.

колебаться в широких пределах. Детально требования к температурному режиму сооружения устанавливаются на основе расчетов температурных полей и термонапряженного состояния возводимого бетонного массива.

Предварительная оценка температурного режима возводимого сооружения может быть выполнена с помощью достаточно простых инженерных методов. Она может быть основана на сравнении разницы температур внутри и снаружи массива с допустимой величиной. Когда разница температур превышает допустимую, растягивающее напряжение также превысит допустимые значения, что приведет к образованию трещины [39]. На таком подходе основана методика, используемая при строительстве бетонных плотин в России [40]. Величина допустимой температуры в массиве бетона зависит от размеров бетонного блока и соотношения модуля упругости бетона и основания. Максимально допустимая температура в массиве бетона определяется по формуле (1):

$$[T_6^{\text{макс}}] = T_6^{\text{ср}} + [\Delta T_6^{\text{макс}}], \quad (1)$$

где $T_6^{\text{ср}}$ — средняя температура в блоке на период эксплуатации; $[\Delta T_6^{\text{макс}}]$ — допустимый перепад температур в блоке на период строительства, определяемый как:

$$[\Delta T_6^{\text{макс}}] = [\Delta T_6^{\text{ср}}] k_{\text{перех}}, \quad [\Delta T_6^{\text{ср}}] = \frac{\varepsilon_{\text{пр}}}{\alpha k_3 k_p k_{\text{тр}}}, \quad (2)$$

где $k_{\text{перех}}$ — коэффициент перехода от средней температуры в блоке в период экзотермии к максимальной ($k_{\text{перех}} = 1,3-1,5$); $\varepsilon_{\text{пр}}$ — предельная растяжимость бетона; α — коэффициент линейного расширения, $\alpha = 1,10^{-5}$; k_3 — коэффициент заземления (средний), $k_3 \in f(H_{\text{бл}}/l_{\text{бл}}, E_{\text{бл}}/E_{\text{осн}})$; k_p — коэффициент релаксации (средний), $k_p \in f(\tau_0, \tau_k, \Delta\tau)$; $k_{\text{тр}}$ — коэффициент запаса на трещинообразование. Предельная растяжимость бетона $\varepsilon_{\text{пр}} \in f(\text{марки, состава, однородности, возраста})$; τ_0 — возраст бетона в момент начала охлаждения бетонной кладки; τ_k — возраст бетона к моменту охлаждения бетонной кладки до температуры омоноличивания строительных швов; $\Delta\tau$ — продолжительность охлаждения.

В Японии оценка образования трещин в массиве бетона может быть сделана с использованием индекса трещинообразования, определяемого следующим образом [41—44]:

$$I_{\text{cr}} = \frac{f_{\text{сп}}(\tau)}{f_i(\tau)}, \quad (3)$$

где I_{cr} — индекс термического трещинообразования; $f_i(\tau)$ — предел прочности при растяжении соответственно «возрасту» бетона τ ; $f_{\text{сп}}(\tau)$ — максимальное температурное напряжение, вызванное процессом гидратации цемента в день τ .

Тенденция к растрескиванию может быть оценена по значению индекса термического трещинообразования в соответствии со значениями, представленными в табл. 1.

Табл. 1. Критерии индекса крекинга для контроля образования трещин в результате процесса гидратации цемента

Table 1. Cracking index criteria for controlling crack formation as a result of cement hydration

Критерии контроля трещин / Crack control Criteria	Индекс термического трещинообразования I_{cr} / Thermal Crack Index I_{cr}
Предотвращение образования трещин / The prevention of cracks	$I_{\text{cr}} \geq 1,5$
Возможность возникновения ограниченных трещин / Possibility of limited cracks	$1,2 \leq I_{\text{cr}} \leq 1,5$
Ограничение возникновения опасных трещин / Limiting the occurrence of dangerous cracks	$0,7 \leq I_{\text{cr}} \leq 1,2$

Из теории прочности бетонных конструкций также известно выражение критерия трещинообразования [45]:

$$\sigma^*(\tau) / E(\tau) \leq \varepsilon'_{\text{пр}} / k, \quad (4)$$

где $\sigma^*(\tau)$ — напряжение в бетонном массиве на момент времени τ ; $E(\tau)$ — модуль упругости бетона на момент времени τ ; $\varepsilon'_{\text{пр}}$ — предельная растяжимость (удлинение) бетона без учета ползучести (получаемая из обычных испытаний на разрыв); k — коэффициент запаса.

В условиях массивного бетонного блока величина $\varepsilon'_{\text{пр}}$ зависит от многих факторов: состава бетона, его возраста, однородности, напряженного состояния, длительности нагрузки, скорости нагружения и т.д. [45]. В первом приближении можно принимать $\varepsilon'_{\text{пр}} = (7-10) \cdot 10^{-5}$.

Таким образом, для оценки возможного трещинообразования необходимо решить задачу о напряженно-деформированном состоянии возводимой конструкции с учетом температурных воздействий.

Мероприятия по снижению температурного трещинообразования

На основе многолетнего опыта в практику возведения бетонных массивных сооружений был внедрен целый ряд мероприятий по снижению вредного воздействия экзотермии цемента. Это как достаточно простые и дешевые методы, так и, наоборот, сложные и дорогостоящие. В каждом конкретном случае необходимо оценивать возможность и целесообразность их использования. Проведем обзор лишь части из них.

1. Подбор цемента и его расход

Самый доступный способ уменьшения нагрева в результате гидратации цемента бетонного массива — уменьшение расхода цемента при изготовлении бетонной смеси и использование так называемых низкотермичных цемента [46, 47]. На рис. 5 представлены кривые скорости тепловыделения для различных по степени тепловыделения цемента. Максимальная интенсивность тепловыделения для низкотермичных цемента составляет ~ 40 кДж/(кг·сут), что гораздо ниже, чем у высокотермичных ~ 300 кДж/(кг·сут) (рис. 5). Сокращение расхода цемента при изготовлении бетонной смеси путем частичной замены его на золу уноса или доменный шлак также может значительно снизить уровень тепловыделения.

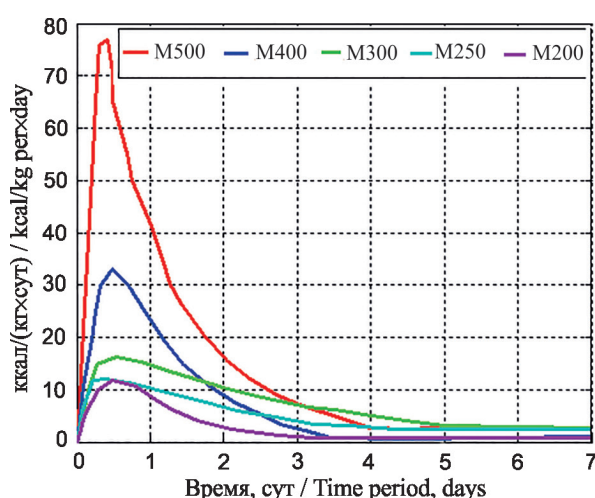


Рис. 5. Кривые изменения интенсивности тепловыделения цемента по результатам лабораторных исследований [4]

Fig. 5. Curves depicting heat evolution of cement based on lab research findings [4]

2. Выбор времени укладки бетона

Регулирование температурного режима возводимого бетонного массива можно достичь за счет выбора времени начала бетонирования массива. Так, возведение плотины благоприятнее с точки зрения термонапряженного состояния начинать в зимне-весенний период, нежели в летне-осенний [29]. Выбор времени в масштабе суток тоже влияет на формирование температурного режима сооружения. Укладка бетона ночью или ранним утром имеет преимущество, так как в этом случае на начальной стадии исключается воздействие солнечной радиации и усадки бетона на возводимую конструкцию.

3. Охлаждение бетона на этапе его подготовки к укладке

Начальная температура бетонной смеси оказывает существенное влияние на максимальную температуру в блоке. Согласно исследованию [48], при

снижении или повышении на 1°C начальной температуры бетонной смеси максимальная температура в возводимом массиве также изменяется в соответствующую сторону примерно на 1°C .

Предварительное охлаждение может реализовываться на разных этапах подготовки бетонной смеси: путем охлаждения составляющих бетона (воды, заполнителей бетона, цемента), охлаждения бетонной смеси в процессе перемешивания и после него [49–50]. Охлаждение бетона в процессе перемешивания путем впрыскивания жидкого азота показано на рис. 6 [52].



Рис. 6. Впрыск жидкого азота в емкость бетоновоза [52]

Fig. 6. Injection of liquid nitrogen into a container truck [52]

4. Охлаждение бетона после его укладки

Охлаждение возводимого массива после укладки бетона может быть поверхностным или внутренним. Поверхностное охлаждение осуществляется путем полива поверхности уложенного бетона холодной водой [48].

Эффективным методом внутреннего охлаждения, в значительной степени снижающим разогрев бетона в период максимального воздействия экзотермического разогрева, является трубное охлаждение. Этот метод обычно применяется для массивных бетонных конструкций (плотины, массивные фундаменты и опоры мостов и т.д.) в приконтактных зонах сооружения (рис. 7). Преимущества метода: охлаждающему воздействию подвержены внутренние, наиболее нагреваемые части сооружения. Кроме того, используя эту систему, возможно регулирование температурного режима за счет изменения периодов и режимов работы системы трубного охлаждения. Данный метод позволяет достаточно быстро снизить максимальную температуру бетона в раннем возрасте до нужных значений.

Впервые трубное охлаждение было использовано при строительстве плотины Гувера в 1933 г. в США [53]. Примеры более позднего применения трубного охлаждения можно наблюдать, например, при строительстве плотины Сян Хун Диан в Китае



Рис. 7. Распределение труб системы охлаждения в бетонном блоке

Fig. 7. Distribution of cooling pipes in a concrete block

в 1955 г. [55], Бурейской ГЭС в 1978 г. в Советском Союзе [56], бетонного основания моста Сео Хэ в Корее в 2000 г. [57], плотины Туйен-Куанг в 2002 г. во Вьетнаме [58], Даганшанской плотины в Китае в 2013 г. [59] и т.д.

Для эффективного использования трубного охлаждения необходимо правильно назначать конструкцию системы трубного охлаждения и параметры ее работы. Важное значение имеет выбор материала и диаметра труб охлаждения, их положения и размеров укладки системы, скорости течения воды и ее температуры, начала и продолжительности работы системы охлаждения и т.д. [59, 60].

Математическое решение задачи о температурном режиме массива с трубным охлаждением базируется на решении двух дифференциальных

уравнений Фурье, основанных на балансе тепловой энергии [61, 62]. Одно из них — основное уравнение теории теплопроводности с учетом выделения теплоты при гидратации цемента:

$$k_b \nabla^2 T_b + Q_r = \rho_b c_b \frac{\partial T_b}{\partial \tau}, \quad (5)$$

где T_b — температура бетона; k_b — коэффициент теплопроводности бетона; c_b — удельная теплоемкость; ρ_b — плотность бетона; τ — время, сут; Q_r — теплота гидратации цемента.

Второе уравнение учитывает теплообмен между охлаждающей жидкостью, движущейся в трубе и бетоном:

$$\rho_w c_w \left(\frac{\partial T_w}{\partial \tau} + u \nabla T_w \right) = k_w \nabla^2 T_w, \quad (6)$$

где T_b — температура бетона; T_w — температура охлаждающей воды; k_w — коэффициент теплопроводности воды; c_w — удельная теплоемкость воды; ρ_w — плотность воды; τ — время, сут; u — скорость движения воды в трубе.

Эти уравнения Фурье могут быть решены с использованием начальных, граничных условий и заданного графика тепловыделения цемента от экзотермии.

На рис. 8 показаны графики изменения температуры в бетонном блоке с использованием трубного-

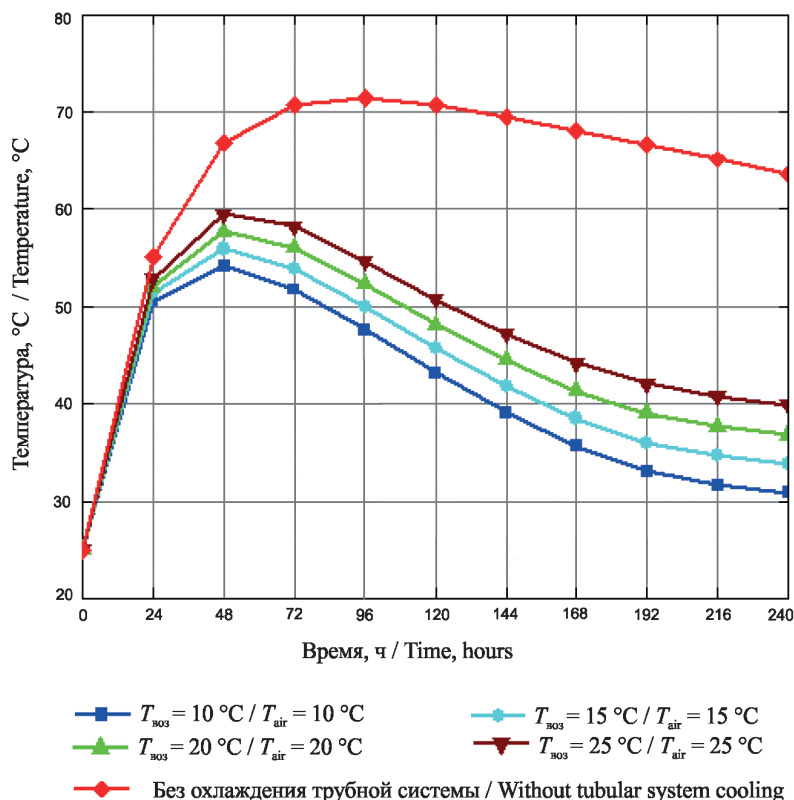


Рис. 8. Влияние температуры воды в системе трубного охлаждения на максимальную температуру в массиве бетона [63]

Fig. 8. The effect of water temperature in a tubular cooling system onto the maximum temperature of mass concrete [63]

го охлаждения и без него. Можно отметить влияние температуры воды в системе охлаждения трубной системы на степень снижения температуры в бетонном блоке.

Использование системы трубного охлаждения является довольно дорогостоящим мероприятием по снижению разогрева массива и требует технико-экономического обоснования. Надо иметь в виду, что при неправильном назначении параметров системы возможно образование температурных трещин вокруг труб охлаждения.

5. Поверхностная теплоизоляция

Цель метода поверхностной теплоизоляции в том, чтобы снизить температурный перепад между поверхностью бетона и внутренней зоной массива. Это уменьшит риск возникновения растягивающих напряжений и температурного трещинообразования [64]. Теплоизоляция может использоваться как в зимний период (для предотвращения чрезмерного охлаждения поверхности бетона), так и летом (для снижения нагрева поверхности).

Существует много типов изоляционных материалов: на основе полимеров (полиэтилен, пенополистирол и т.д.), в виде слоя воды или песка, мешковины или брезента (рис. 9). Толщина и степень изоляции зависят от требования допустимой разницы температур между центром и поверхностью бетонного блока.

6. Выбор толщины укладываемого слоя бетона

Толщина укладки слоев бетона влияет на величину максимального разогрева возводимого бе-

тонного массива, скорость возведения сооружения и стоимость строительства. Путем выбора толщины укладываемого слоя можно в определенных пределах регулировать температурный режим.

Для иллюстрации этого утверждения рассмотрим два варианта укладки бетона с различной толщиной: с толщиной слоев 2 и 4 м. Примем размеры возводимого бетонного массива: высота 20 м и ширина 18 м. Скорость роста стены в высоту примем одинаковой и равной 12 м в месяц. Пусть температура воздуха постоянна и равна 17 °С, температура земли — 8 °С, начальная температура укладываемого бетона — 20 °С. Принятые величины основных физико-механических характеристик бетона и грунта представлены в табл. 2.

Табл. 2. Физико-механические характеристики бетона и грунта

Table 2. Physico-mechanical characteristics of concrete and soil

Характеристика / Characteristic	Бетон / Concrete	Грунт / Soil
Коэффициент теплопроводности, Вт/м°C / Thermal conductivity, W/m°C	2,77	3,59
Коэффициент теплоемкости, кДж/кг°C / Specific heat, kJ/kg°C	0,95	0,85
Средняя плотность, кг/м³ / Density, kg/m³	2400	2600
Коэффициент теплопередачи, Вт/м²°C / Heat transfer coefficient, W/m²°C	14,46	15,05



Рис. 9. Применение теплоизоляционного слоя на поверхности [64, 65]

Fig. 9. Application of a thermal insulation layer on the surface [64, 65]

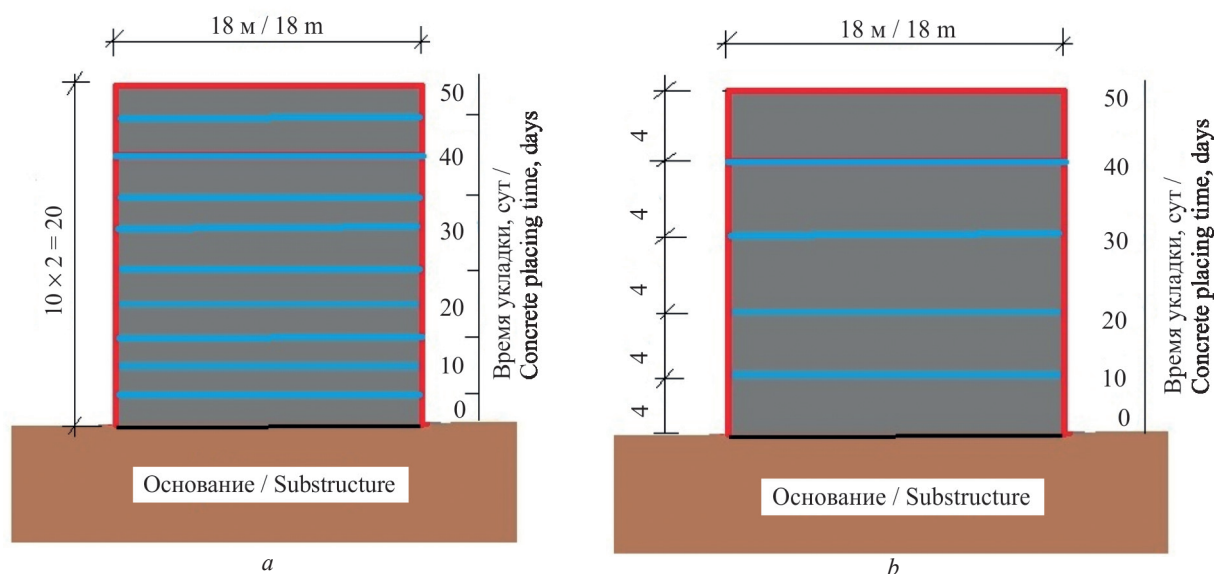


Рис. 10. Расчетная схема: *a* — толщина укладываемого слоя 2 м; *b* — толщина укладываемого слоя 4 м

Fig. 10. Design model: *a* — layer thickness — 2 m; *b* — layer thickness — 4 m

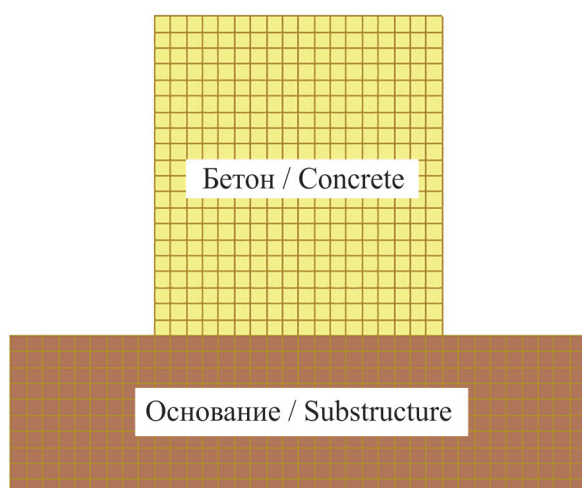


Рис. 11. Сетка конечных элементов расчетной области

Fig. 11. Finite element mesh for the area to be exposed to the analysis

Расчетные схемы и сетка конечных элементов расчетной области показаны на рис. 10 и 11. С помощью программного комплекса MIDAS решим численно температурную задачу [66]. Сравним распределение температур для двух вариантов укладки бетонного массива. В расчетах принят расход цемента 150 кг/м³ на кубометр бетона и его максимальное тепловыделение 350 кДж/кг. Результаты расчетов представлены на рис. 12.

Сравнение результатов для двух вариантов бетонирования: максимальная температура для варианта толщины слоя 2 м составляет 36,66 °С, а при толщине 4 м — 39,70 °С. Что подтверждает тот факт, что при одинаковой скорости возведения чем больше толщина укладываемого слоя, тем больше температура в центре бетонного массива.

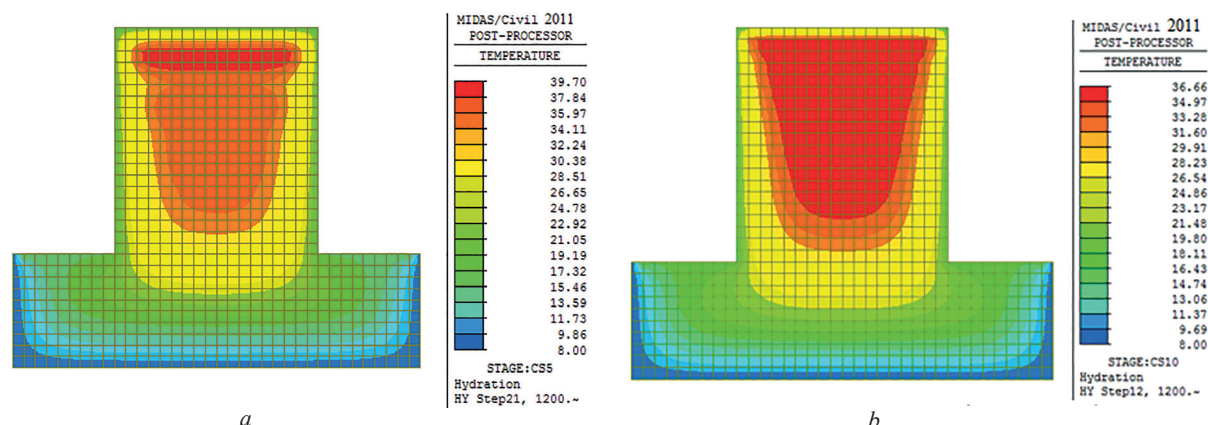


Рис. 12. Распределение температуры в бетонном блоке: варианта 1 (*a*); варианта 2 (*b*)

Fig. 12. Temperature distribution in the concrete block: case 1 (*a*); case 2 (*b*)

7. Преимущества и недостатки мер для предотвращения образования трещин

На основе обзора литературы попытаемся оценить преимущества и недостатки методов контроля за образованием температурных трещин (табл. 3).

Проблемы температурного режима и трещинообразования в бетонных плотинах в течение многих лет исследовались учеными не только в России, но и во многих странах мира. Этой проблеме посвящены труды Л.Е. Преловой, Н.И. Фрадкиной, К.И. Дзюбы, М.И. Детковой, Н.А. Анискина, Нгуен Хоанга, Нгуен Данг Жанга, С.М. Гинзбург, Л.В. Корсаковой, Н.В. Павленко, Б.Е. Веденеева, Т.Ю. Крат, Т.Н. Рукавишников, В.И. Телешева, Н.И. Ватина, А.Н. Марчука, М.В. Комаринского, A. Wondwosen, U. Girum, T. Kurian, P.E. Kavitha, B. Kuriakose, M.L. Adrian, B. Li, Z. Wang, Y. Jiang, Z. Zhu, A. Rahimi, J. Noorzaei, Le Quoc Toan, Nguyen Minh Viet, Vo Van Lung, Dang Quoc Dai и многих других авторов [67–78]. Однако и сегодня можно сказать, что эта проблема не решена до конца: почти во всех современных бетонных плотинах образуются трещины, с различной степенью влияющие на работоспособность сооружения.

Причина того, что, несмотря на многолетние исследования и практику строительства бетонных плотин, проблема температурного трещинообра-

зования окончательно не решена, заключается во влиянии на формирование температурного режима множества действующих факторов и уникальных особенностей возводимых сооружений такого типа, как бетонная плотина [79–83]. Это в значительной степени усложняет решение задачи.

Одним из возможных решений поставленной задачи может быть создание математической прогнозной модели температурного режима послойно укладываемого бетонного массива в зависимости от основных действующих факторов. Использование такой модели позволит принимать рациональные решения по составу бетонов (расходу цемента и его тепловыделению) и технологической схеме возведения бетонных плотин (интенсивность возведения плотины по высоте, толщина укладываемого слоя бетона). Попытки создания аналогичных математических моделей предпринимались ранее, однако они рассматривали конкретные объекты и условия возведения и ограниченное количество влияющих на процесс факторов [4¹, 6].

В качестве примера создания математической прогнозной модели рассмотрим результаты, полученные авторами. Проведены исследования о влиянии некоторых значимых факторов на температурный режим возводимого бетонного массива.

Табл. 3. Преимущества и недостатки мер для контроля за образованием температурных трещин

Table 3. Advantages and disadvantages of measures to control the formation of temperature cracks

Меры / Measures	Преимущества / Advantages	Недостатки / Disadvantages
Использование низкотермичных материалов / Use of low heat materials	Экономично / Economically	Может уменьшить прочность бетона / May reduce concrete strength
Выбор времени укладки бетона / The choice of concrete placement time	Доступно / Available	Эффективно только для строительства небольших плотин / Effective only for the construction of small dams
Охлаждение бетона на этапе его подготовки к укладке / Concrete cooling during preparation for laying	Эффективно / Effectively Доступно / Available Дешево / Cheap	Прочность бетона может не развиваться правильно из-за локального замораживания / Concrete strength may not develop properly due to local freezing
Охлаждение бетона после его укладки / Concrete cooling after laying	Эффективно для больших конструкций (плотин) / Effective for large structures (dams)	Дорого / Expensive Может привести к термическому растрескиванию вокруг труб / May cause thermal cracking around pipes
Поверхностная теплоизоляция / Surface insulation	Экономично / Economically	Не так эффективен, как другие методы, из-за замедления скорости строительства / Not as effective as other methods, due to the slowdown in construction speed Задержки из-за снижения скорости охлаждения могут быть дорогостоящими / Delays due to lower cooling speeds can be costly Преждевременное удаление поверхностной изоляции может привести к появлению трещин / Premature removal of surface insulation can lead to cracking
Выбор толщины укладываемого слоя бетона / Choosing the thickness of the concrete layer to be laid	Недорогой / Inexpensive	Может замедлить скорость строительства / Can slow down the speed of construction

Определение температурных полей массива проводилось с использованием метода конечных элементов (МКЭ) с применением вычислительного комплекса MIDAS CIVIL [66].

Рассмотрено возведение бетонного столба на массиве основания в климатических условиях Республики Вьетнам. Расчеты проведены для двух случаев температурного воздействия среды. В первом случае температура воздуха принята постоянной и равной 26,5 °C (соответствует лету северного Вьетнама). Во втором случае температура воздуха принята постоянной и равной 17 °C (соответствует зиме северного Вьетнама) [7]. Среднемесячная интенсивность бетонирования плотины (скорость возведения по высоте) в расчетах принята $V = 0,3$ м/сут (часто встречается в современной практике плотностроения) [7].

Для построения математической модели использовалась методика планирования эксперимента [4, 14, 29]. Было рассмотрено влияние следующих климатических и технологических факторов: X_1 (Ц) — расход цемента, кг/м³ (приняты границы изменения от 50 до 200); X_2 (Δ) — толщина укладываемого слоя, м (приняты границы изменения от 0,3 до 1,5); X_3 (Θ_{max}) — максимальное тепловыделение цемента, кДж/кг (приняты границы изменения от 120 до 350); X_4 (L_м) — длина блока, м (приняты границы изменения от 10 до 40); X_5 ($t_{\text{уклад}}$) — температура укладываемого бетона смеси, °C (приняты границы изменения от 10,0 до 25,0).

Величина максимальной температуры внутри массива, принятая в качестве функции отклика,

определялась в виде уравнения регрессии (после исключения малозначимых членов уравнений):

• для варианта бетонирования в летний период:

$$T_{\text{макс}} = 39,81 + 5,08X_1 + 1,26X_2 + 4,12X_3 + 1,16X_4 + 3,57X_5 + 0,12X_1X_2 + 2,52X_1X_3 + 0,10X_1X_2X_3. \quad (7)$$

• для варианта бетонирования в зимний период:

$$T_{\text{макс}} = 28,99 + 5,10X_1 + 0,87X_2 + 4,17X_3 + 0,58X_4 + 3,09X_5 + 0,14X_1X_2 + 2,48X_1X_3 + 0,12X_2X_3. \quad (8)$$

Рассмотрев полученные функции откликов уравнения (7), (8), можно отметить следующее. Большинство рассмотренных факторов оказывают достаточно большое влияние на величину максимальной температуры бетонного массива. Температура в наибольшей степени зависит от факторов X_1 (Ц), X_3 (Θ_{max}) и X_5 ($t_{\text{уклад}}$). На основе полученных уравнений были построены номограммы для определения максимальной температуры в бетонной плотине (рис. 13, 14).

Использование номограмм позволяет оперативно оценить степень разогрева бетонного массива или решить обратную задачу — по величине допустимой максимальной температуры определить возможные сочетания рассмотренных факторов.

ВЫВОДЫ

Обобщая вышеизложенное, можно сделать следующие выводы. Несмотря на многолетний опыт строительства бетонных плотин, теоретическое и практическое изучение вопроса, проблема температурного трещинообразования при возведении

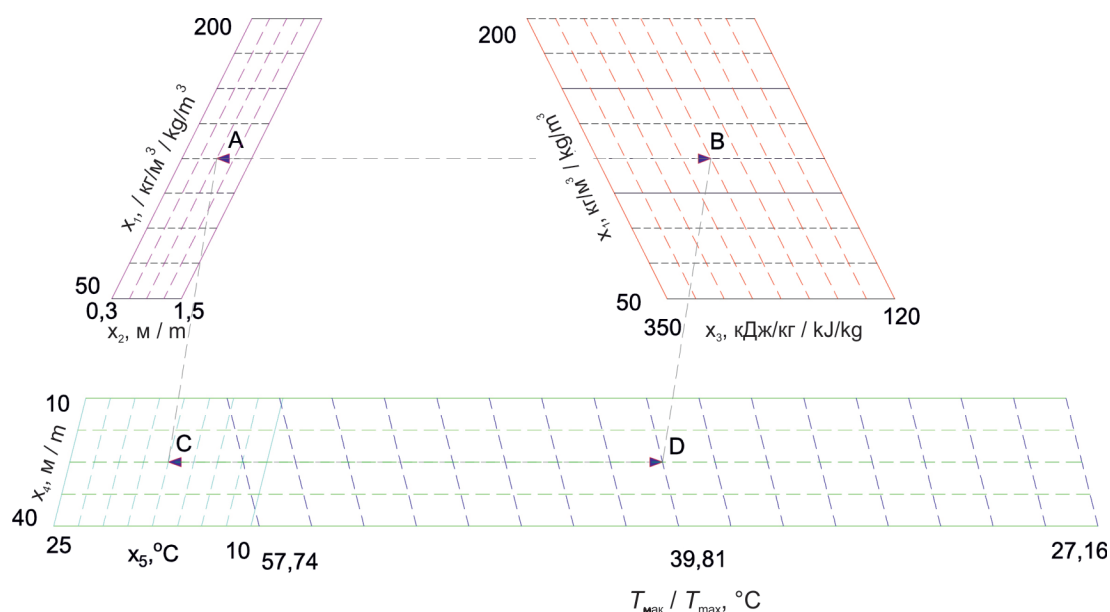


Рис. 13. Номограмма для определения максимальной температуры в центре возводимой бетонной плотины из укатанного бетона (при укладке бетона летом)

Fig. 13. Nomogram in order to determine the maximum temperature at the center in a concrete dam made of roller-compacted concrete (when laying concrete in the summer)

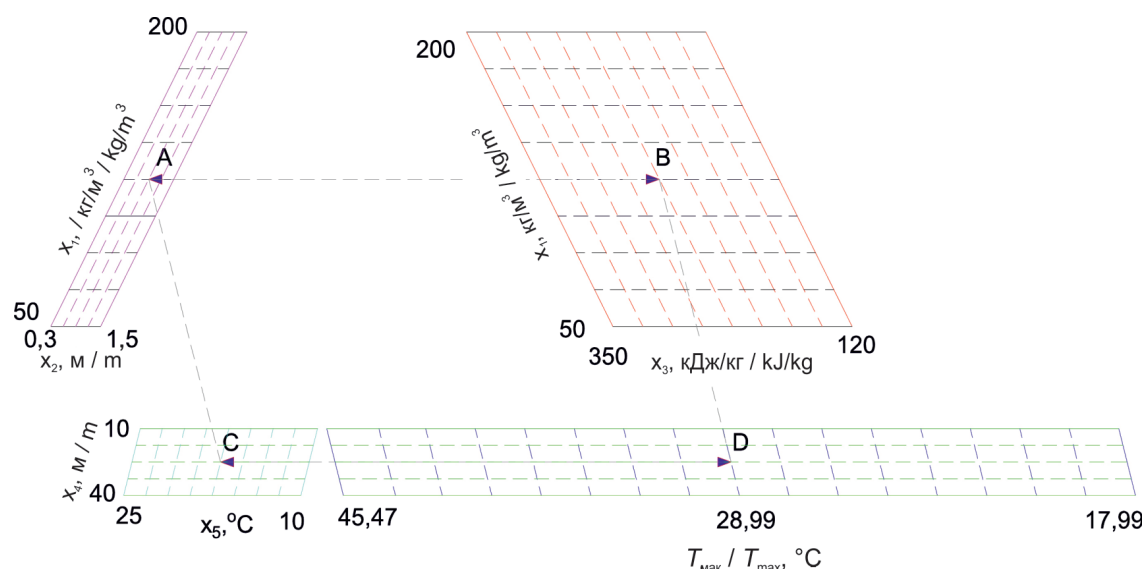


Рис. 14. Номограмма для определения максимальной температуры в центре возводимой бетонной плотины из укатанного бетона (при строительстве зимой)

Fig. 14. Nomogram in order to determine the maximum temperature at the center in a concrete dam made of roller-compacted concrete (when construction in winter)

массивных бетонных сооружений остается весьма актуальной. Проведенный обзор состояния и изученности данного вопроса позволяет сформулировать основные направления для решения проблемы температурного трещинообразования в бетонных гравитационных плотинах:

- изучение степени и особенностей влияния факторов на температурный режим возводимого бетонного массива;
- разработка расчетной методики учета влияния действующих факторов (например, трубного охлаж-

дения, поверхностной теплоизоляции и т.д.) на температурный режим и термонапряженное состояние бетонного массива;

- создание математических моделей температурного режима и термонапряженного состояния бетонного массива с учетом основных влияющих факторов в процессе возведения;
- разработка рекомендаций по регулированию температурного режима и термонапряженного состояния возводимого бетонного массива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barbara K., Maciej B., Maciej P., Aneta Z. Analysis of cracking risk in early age mass concrete with different aggregate types // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 193. Pp. 234–241. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.209
2. Bingqi L., Zhenhong W., Yunhui J., Zhenyang Z. Temperature control and crack prevention during construction in steep slope dams and stilling basins in high-altitude areas // *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 10. Pp. 1–15. DOI: 10.1177/1687814017752480
3. Kuzmanovic V., Savic L., Mladenovic N. Computation of thermal-stresses and contraction joint distance of rcc dams // *Journal of Thermal Stresses*. 2013. Vol. 36. Issue 2. Pp. 112–134. DOI: 10.1080/01495739.2013.764795
4. Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Анискин Н.А., Малаханов В.В., Бестужева А.С., Саинов М.П. и др. Гидротехнические сооружения, часть 2. М., 2011. 535 с.
5. Khanzaei P., Abdulrazeg A.A., Samali B., Ghaedi K. Thermal and structural response of RCC dams during their service life // *Journal of Thermal Stresses*. 2015. Vol. 38. Pp. 591–609. DOI: 10.1080/01495739.2015.1015862
6. Zhang X., Shi R., Dai H., Liu Q., Zhang X. Simulation and research on temperature field of taishan roller compacted concrete gravity dam // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 237. P. 032117. DOI: 10.1088/1755-1315/237/3/032117
7. Анискин Н.А., Нгуен Ч.Ч. Термонапряженное состояние бетонной плотины из укатанного бетона в процессе возведения во Вьетнаме // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 11. С. 57–61.
8. Sayed-Ahmed E.Y., Abdelrahman A.A., Embaby R.A. Concrete dams: thermal-stress and construction stage analysis // *Dams and Reservoirs*. 2018. Vol. 28. Issue 1. Pp. 12–30. DOI: 10.1680/jdare.16.00055

9. Анискин Н.А. Температурный режим гравитационной плотины из укатанного бетона // Гидротехническое строительство. 2005. № 12. С. 13–17.
10. Анискин Н.А. Прогноз экзотермического разогрева массивных бетонных сооружений // Вестник МГСУ. 2009. № 3. С. 216–223.
11. Cervera M., Oliver J., Prato T. Simulation of construction of RCC dams – II: Stress and damage // Journal of Structural Engineering. 2000. Vol. 126. Issue 9. Pp. 1062–1069. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2000)126:9(1062)
12. Ben-Gao Yang, Peng He, Gao-You Peng, Tong Lu. Temperature-stress coupling mechanism analysis of one-time pouring mass concrete // Thermal Science. 2019. Vol. 23. Issue 3. Part A. Pp. 1615–1621. DOI: 10.2298/tsci180825231y
13. Nguyen T.C., Bui A.K. Evaluation of the impact of parameter inputs of concrete mix on the distribution of temperature in the mass concrete structure // Structural Integrity and Life. 2019. Vol. 19. Issue 1. Pp. 8–12.
14. Aniskin N.A., Nguyen T.C. The thermal stress of roller-compacted concrete dams during construction // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. P. 04059. DOI: 10.1051/mateconf/201819604059
15. Zheng Si, Qian Zhang, Ling Zhi Huang, Dan Yang. Development of simulation program for temperature field of mass concrete structures // E3S Web of Conferences. Vol. 38. P. 03020. DOI: 10.1051/e3sconf/20183803020
16. Jia Chao, Shao Anzhi, Li Yong, Ren Qingwen. Analyses of thermal stress field of high concrete dams during the process of construction // National Program on Key Basic Research. 2007. Pp. 112–117. DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5449456
17. Гинзбург С.М., Рукавишников Т.Н., Шейнкер Н.Я. Применение имитационных моделей при идентификации параметров температурного режима бетонных массивов с стадии возведения // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2002. Т. 241. 240 с.
18. Tressa Kurian, Kavitha P.E., Bennet Kuria-kose. Numerical analysis of temperature distribution across the cross section of a concrete dam during early ages // American Journal of Engineering Research (AJER). 2013. Vol. 1. Pp. 26–31.
19. Нгуен Данг Жанг. Температурный режим бетонных гравитационных плотин : дис. ...канд. техн. наук. М., 2006. 177 с.
20. Нгуен Хоанг. Регулирование температурного режима бетонных массивно-контрфорсных плотин : дис. ...канд. техн. наук. М., 2014. 165 с.
21. Li Q., Liang G., Hu Y., Zuo Z. Numerical analysis on temperature rise of a concrete arch dam after sealing based on measured data // Mathematical Problems in Engineering. 2014; 12. DOI: 10.1155/2014/602818
22. Zhang X.G., Wang T., Sun J.P., Zhang Q., Song Z.P., Wang J.J. Numerical simulation analysis of temperature control of large volume concrete aqueduct // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 199. P. 032044. DOI: 10.1088/1755-1315/199/3/032044
23. Adrian M.L. A finite element model for the prediction of thermal stresses in mass concrete. University of Florida, 2009. 177 p.
24. Vladan K., Ljubodrag S., Nikola M. Computation of thermal-stresses and contraction joint distance of RCC dams // Journal of Thermal Stresses. 2013. Vol. 36. Pp. 112–134. DOI: 10.1080/01495739.2013.764795
25. ACI Committee 207 – Mass and thermally controlled concrete. 2017. 30 p.
26. Fu W.Q., Han S.F. Prevention and control of concrete project crack. In: Han SF, Geng WS, editors. Control instruction of reinforced concrete structure crack. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. Pp. 213–242.
27. Thi My Dung Do, Thanh Quang Khai Lam. Solutions to improve the quality of mass concrete construction in climate conditions of Southern Vietnam // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). 2019. Vol. 8. Issue 6C2. Pp. 188–192.
28. Castilho E., Schcla N., Tiago C., Farinha M.L.B. FEA model for the simulation of the hydration process and temperature evolution during the concreting of an arch dam // Engineering Structures. 2018. Vol. 174. Pp. 165–177. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.07.065
29. Aniskin N., Nguyen T.C. Temperature regime of massive concrete dams in the zone of contact with the base // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 042083. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042083
30. Zhu Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete // Prin. in the Uni. States of Amer. 2014. 497 p. DOI: 10.1016/C2012-0-06038-3
31. Телешев В.И., Ватин Н.И., Марчук А.Н., Комаринский М.В. Производство гидротехнических работ. Т.1. М., 2012. 485 с.
32. Анискин Н.А., Нгуен Чонг Чык, Брянский И.А., Дам Хыу Хынг. Определение температурного поля и термонапряженного состояния укладываемого бетонного массива методом конечных элементов // Вестник МГСУ. 2018. № 13 (11). С. 1407–1418. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.11.1407-1418
33. Nguyen T.C., Pham V.T., Bui A.K. The effects of insulation thickness on temperature field and evaluating cracking in the mass concrete // Electronic Journal of Structural Engineering. 2018. Vol. 18. Issue 2. Pp. 128–132.
34. Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса. Томск, 2016. 92 с.
35. Крат Т.Ю., Рукавишников Т.Н., Веденеева Б.Е. Оценка температурного режима и термонапряженного состояния блоков водослива при различных условиях бетонирования // Известия ВНИИГ. 2007. Т. 248. С. 77–85.

36. Hai T.H., Thuc L.V. The effect of splitting concrete placement on controlling thermal cracking in mass concrete // *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*. 2017. Vol. 11. Issue 6. Pp. 22–28. URL: <http://stee.nuce.edu.vn/index.php/en/article/view/932>
37. Tu A.D., Adrian M.L., Mang T., Michael J.B. Importance of insulation at the bottom of mass concrete placed on soil with high groundwater // *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2013. Vol. 2342. Pp. 113–120. DOI: 10.3141/2342-14
38. Ding H., Zhang L., Zhang P., Zhu Q. Thermal and stress analysis of early age concrete for spread footing // *Transactions of Tianjin University*. 2015. Vol. 21. Issue 6. Pp. 477–483. DOI: 10.1007/s12209-015-2563-0
39. Zreiki J., Bouchelaghem F., Chaouche M. Early-age behaviour of concrete in massive structures, experimentation and modeling // *Nuclear Engineering and Design*. 2010. Vol. 240. Issue 10. Pp. 2643–2654. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.07.010
40. Телешев В.И., Ватин Н.И., Марчук А.Н., Комаринский М.В. Производство гидротехнических работ. Т.1. М., 2012. 485 с.
41. Zhong R., Hou G., Qiang S. An improved composite element method for the simulation of temperature field in massive concrete with embedded cooling pipe // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 124. Pp. 1409–1417. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.124
42. Nguyen T.C., Tang V.L., Bulgakov B.I. Designing the composition of concrete with mineral additives and assessment of the possibility of cracking in cement concrete pavement // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931. Pp. 667–673. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.667
43. Seo Ki-Young, Kim Hee-Sung, Jin Chi-Sub. Determination of thermal cracking index of internal restricted mass concrete using a numerical analysis // *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*. 2007. Vol. 11. Issue 1. Pp. 57–67.
44. Bamforth P.B. Early-age thermal crack control in concrete. London, 2007. 268 p.
45. Эйдельман С.Я. Натурные исследования бетонной плотины Братской ГЭС. Ленинградское отделение, 1975. 293 с.
46. Zhang Xiao-fei, Li Shou-yi, Li Yan-long, Ge Yao, Li Hui. Effect of superficial insulation on roller-compacted concrete dams in cold regions // *Advances in Engineering Software*. 2011. Vol. 42. Issue 11. Pp. 939–943. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2011.06.004
47. Lam T.V., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Larsen O.A., Anh P.N. Effect of rice husk ash and fly ash on the compressive strength of high performance concrete // *E3S Web of Conf*. 2018. Vol. 33. P. 02030. DOI: 10.1051/e3sconf/20183302030
48. Japan Concrete Institute. Guidelines for control of cracking of mass concrete 2016 // Published by japan concrete institute. 302 p.
49. Aniskin N.A., Nguyen T.C., Hoang Q.L. Influence of size and construction schedule of massive concrete structures on its temperature regime // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251. P. 02014. DOI: 10.1051/matecconf/201825102014
50. Abdel-Raheema M., Quintanaa O., Moralesa M., Marroquin-Villaa Y., Ramosa D., Hernandez S. Construction methods used for controlling temperature in mass concrete structures // *Creative Construction Conference*. 2018. Pp. 139–146. DOI: 10.3311/CCC2018-019
51. Gajda J., Vangeem M. Controlling temperatures in mass concrete // *Concrete international*. 2002. Vol. 1. Pp. 60–62.
52. Nagataki S., Ono S. State of the art of pre-cooling method for massive concrete // *Concrete Technology*. 1991. Vol. 29. Issue 12.
53. Sheng-hong Chen, Peifang Su, Isam Shahrour. Composite element algorithm for the thermal analysis of mass concrete Simulation of cooling pipes // *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2011. Vol. 21. Issue 4. Pp. 434–447. DOI: 10.1108/09615531111123100
54. Zheng W., Pan P., Ye L. Study on thermal stress and temperature cracks control of longlin roller compacted concrete gravity dam // *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 212–213. Pp. 912–916. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.212-213.912
55. Chao Li, Yang Li. Optimization of cooling pipes inside mass concrete bridge pile cap // *The 2nd World Conference on Humanities and Social Sciences*. 2017. Pp. 25–30. URL: https://webofproceedings.org/proceedings_series/ESSP/WCHSS%202017/WCHSS005.pdf
56. Liu X., Zhang C., Chang X., Zhou W., Cheng Y., Duan Y. Precise simulation analysis of the thermal field in mass concrete with a pipe water cooling system // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 78. Pp. 449–459. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.050
57. Qiu Y., Zhan G. Stress and damage in concrete induced by pipe cooling at mesoscopic scale // *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 9. Issue 2. Pp. 1–17. DOI: 10.1177/1687814017690509
58. Yong-xing Hong, Wen Chen, Ji Lin, Jian Gong, Hong-da Cheng. Thermal field in water pipe cooling concrete hydrostructures simulated with singular boundary method // *Water Science and Engineering*. 2017. Vol. 10. Issue 2. Pp. 107–114. DOI: 10.1016/j.wse.2017.06.004
59. Klemczak B., Knoppik A.W.K. Reinforced concrete tank walls and bridge abutments: Early-age behaviour, analytic approaches and numerical models // *Engineering Structures*. 2005. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.11.031

60. Su H., Duan D., Lu Z. Research on crack control of mass concrete structure // *Insight – Civil Engineering*. 2018. Vol. 1. Pp. 11–19. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/ba96/2d396c6b0cf6a279ea36d6c9b89271c11486.pdf>
61. Cheng J., Li T.C., Liu X., Zhao L.H. A 3D discrete FEM iterative algorithm for solving the water pipe cooling problems of massive concrete structures // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2016. Vol. 40. Issue 4. Pp. 487–508. DOI: 10.1002/nag.2409
62. Liu X., Zhang C., Chang X., Zhou W., Cheng Y., Duan Y. Precise simulation analysis of the thermal field in mass concrete with a pipe water cooling system // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 78. Issue 5. Pp. 449–459. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.050
63. Nguyen T.C., Huynh T.P., Tang V.L. Prevention of crack formation in mass concrete at early age by cooling pipe system // *Asian Journal of Civil Engineering*. 2019. Vol. 20. Issue 8. Pp. 1101–1107. DOI: 10.1007/s42107-019-00175-5
64. Nguyen T.C., Luu X.B. Reducing temperature difference in mass concrete by surface insulation // *Magazine of Civil Engineering*. 2019. Vol. 4 (88). Pp. 70–79. DOI: 10.18720/MCE.88.7
65. Yuan-Yuan Chen, Ssu-Yu Chen, Chien-Jou Yang, Hei-Tao Chen. Effects of insulation materials on mass concrete with Pozzolans // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 137. Pp. 261–271. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.059
66. Nguyen C.T., Aniskin N.A. Temperature regime during the construction massive concrete with pipe cooling // *Magazine of Civil Engineering*. 2019. Vol. 89 (5). Pp. 156–166. DOI: 10.18720/MCE.89.13
67. Васильев П.И., Кононов Ю.И., Малькевич А.Б., Семенов К.В. Термонапряженное состояние массивной бетонной стены (плиты) в строительный период: методические указания к курсовому проекту. СПб.: ЛГТУ, 1991. 32 с.
68. Семенов К.В., Константинов И.А., Савченко А.В., Кокорева К.А., Нестеров А.А. Эффект температурного воздействия в расчетах термонапряженного состояния дискретно наращиваемых бетонных тел // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015. № 5 (32). С. 18–28.
69. Rahimi A., Noorzaei J. Thermal and structural analysis of roller compacted concrete (RCC) dams by finite element code // *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011. Vol. 5. No. 12. Pp. 2761–2767.
70. Ртищева А.С. Теоретические основы гидравлики и теплотехники: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 171 с.
71. Фрид С.А. Температурные напряжения в бетонных и железобетонных конструкциях гидротехнических сооружений. М.: Стройиздат, 1959. 72 с.
72. Бушманова А.В., Барабанищikov Ю.Г., Семенов К.В., Стручкова А.Я., Мановицкий С.С. Термическая трещиностойкость массивных фундаментных плит в строительный период // *Инженерно-строительный журнал*. 2017. № 8 (76). С. 193–200.
73. Бушманова А.В., Виденков Н.В., Семенов К.В., Барабанищikov Ю.Г., Дернакова А.В., Корovina В.К. Термонапряженное состояние массивных бетонных конструкций // *Инженерно-строительный журнал*. 2017. № 3 (71). С. 51–60.
74. Aniskin N., Nguyen T.C. Influence factors on the temperature field in a mass concrete // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199705021
75. Нгуен Минь Вьет. Изучение решений по снижению термонапряженного состояния плотины из укатанного бетона во Вьетнаме: дис. ...к.т.н. Университет водных ресурсов в Ханое, 2017. 153 с.
76. Conrad M., Morris D., Steiger K. Thermal stress analysis of the son la dam during its construction // *ICOLD Hanoi Symposium*. 2010.
77. Во Ван Лунг, Данг Куок Дай. Исследования по контролю термонапряженного состояния плотин из укатанного бетона (провинция Куангнам). Отчет о дизайн-проекте. Ханой: институт ирригационного проектирования, 2010. 17 с.
78. Jaafara M.S., Bayagoob K.H., Noorzaei J., Waleed A.M.T. Development of finite element computer code for thermal analysis of roller compacted concrete dams // *Advances in Engineering Software*. 2007. Vol. 38. Issue 11–12. Pp. 886–895. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2006.08.040
79. Гинзбург С.М., Рукавишников Т.Н., Шейнкер Н.Я. Имитационные модели для оценки температурного режима бетонной плотины на примере Бурейской ГЭС // *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 2002. Т. 241. С. 173–178.
80. Гинзбург С.М., Рукавишников Т.Н., Шейнкер Н.Я. Применение имитационных моделей при идентификации параметров температурного режима бетонных массивов с стадии возведения // *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 2002. Т. 241. 240 с.
81. Крат Т.Ю., Рукавишников Т.Н., Веденеева Б.Е. Оценка температурного режима и термонапряженного состояния блоков водослива при различных условиях бетонирования // *Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. 2007. Т. 248. С. 77–85.
82. Hongjie Chen, Zaobao Liu. Temperature control and thermal-induced stress field analysis of gongguo-qiao RCC dam // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018. 11 p. DOI: 10.1007/s10973-018-7450-1
83. Aniskin N.A., Nguyen T.C. Temperature regime and thermal stress in a concrete massif with pipe cooling // *Power Technology and Engineering*. 2019. Vol. 52. Issue 6. Pp. 638–643. DOI: 10.1007/s10749-019-01009-9

Поступила в редакцию 27 сентября 2019 г.

Принята в доработанном виде 8 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 27 февраля 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Николай Алексеевич Анискин** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 260568; aniskin@gic.mgsu.ru;

Нгуен Чонг Чык — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 956450; hydraulics@gic.mgsu.ru.

REFERENCES

1. Barbara K., Maciej B., Maciej P., Aneta Z. Analysis of cracking risk in early age mass concrete with different aggregate types. *Procedia Engineering*. 2017; 193:234-241. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.209
2. Bingqi L., Zhenhong W., Yunhui J., Zhenyang Z. Temperature control and crack prevention during construction in steep slope dams and stilling basins in high-altitude areas. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018; 10:1-15. DOI: 10.1177/1687814017752480
3. Kuzmanovic V., Savic L., Mladenovic N. Computation of thermal-stresses and contraction joint distance of rcc dams. *Journal of Thermal Stresses*. 2013; 36(2):112-134. DOI: 10.1080/01495739.2013.764795
4. Rasskazov L.N., Orekhov V.G., Aniskin N.A., Malakhanov V.V., Bestuzheva A.S., Sainov M.P., Soldatov P.V., Tolstikov V.V. *Hydraulic structures, part 2*. Moscow, 2011; 535. (rus.).
5. Khanzaei P., Abdulrazeg A.A., Samali B., Ghaedi K. Thermal and structural response of RCC dams during their service life. *Journal of Thermal Stresses*. 2015; 38:591-609. DOI: 10.1080/01495739.2015.1015862
6. Zhang X., Shi R., Dai H., Liu Q., Zhang X. Simulation and research on temperature field of taishan roller compacted concrete gravity dam. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 237:032117. DOI: 10.1088/1755-1315/237/3/032117
7. Aniskin N.A., Nguen Ch.Ch. Thermal stress state of a roled concrete dam during construction in Vietnam. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 11:57-61. (rus.).
8. Sayed-Ahmed E.Y., Abdelrahman A.A., Embaby R.A. Concrete dams: thermal-stress and construction stage analysis. *Dams and Reservoirs*. 2018; 28(1):12-30. DOI: 10.1680/jdare.16.00055
9. Aniskin N.A. Temperature regime of a gravity dam from rolled concrete. *Hydrotechnical Construction*. 2005; 12:13-17. (rus.).
10. Aniskin N.A. Forecast of exothermic heating of massive concrete structures. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2009; 3:216-223. (rus.).
11. Cervera M., Oliver J., Prato T. Simulation of construction of RCC dams - II: Stress and damage. *Journal of Structural Engineering*. 2000; 126(9):1062-1069. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2000)126:9(1062)
12. Ben-Gao Yang, Peng He, Gao-You Peng, Tong Lu. Temperature-stress coupling mechanism analysis of one-time pouring mass concrete. *Thermal Science*. 2019; 23(3 Part A):1615-1621. DOI: 10.2298/tsci180825231y
13. Nguyen T.C., Bui A.K. Evaluation of the impact of parameter inputs of concrete mix on the distribution of temperature in the mass concrete structure. *Structural Integrity and Life*. 2019; 19(1):8-12.
14. Aniskin N.A., Nguyen T.C. The thermal stress of roller-compacted concrete dams during construction. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 196:04059. DOI: 10.1051/mateconf/201819604059
15. Zheng Si, Qian Zhang, Ling Zhi Huang, Dan Yang. Development of simulation program for temperature field of mass concrete structures. *E3S Web of Conferences*. 2018; 38:03020. DOI: 10.1051/e3sconf/20183803020
16. Jia Chao, Shao Anzhi, Li Yong, Ren Qingwen. Analyses of thermal stress field of high concrete dams during the process of construction. *National Program on Key Basic Research*. 2007; 112-117. DOI: 10.1109/APPEEC.2010.5449456
17. Ginzburg S.M., Rukavishnikova T.N., Sheynker N.Ya. The use of simulation models to identify the temperature parameters of concrete massifs from the construction stage. *Proceedings VNIIG Vedeneeva*. 2002; 241:240. (rus.).
18. Tressa Kurian, Kavitha P.E., Bennet Kuriakose. Numerical analysis of temperature distribution across the cross section of a concrete dam during early ages. *American Journal of Engineering Research (AJER)*. 2013; 1:26-31.
19. Nguen Dang Zang. *Temperature regime of concrete gravity dams* : dis. ... cand. tech. of sciences. Mocsow, 2006; 177. (rus.).
20. Nguen Khoang. *Temperature regulation of concrete massive buttress dams* : dis. ... cand. tech. of sciences. Mocsow, 2014; 165. (rus.).
21. Li Q., Liang G., Hu Y., Zuo Z. Numerical analysis on temperature rise of a concrete arch dam after seal-

ing based on measured data. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014; 12. DOI: 10.1155/2014/602818

22. Zhang X.G., Wang T., Sun J.P., Zhang Q., Song Z.P., Wang J.J. Numerical simulation analysis of temperature control of large volume concrete aqueduct. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018; 199:032044. DOI: 10.1088/1755-1315/199/3/032044

23. Adrian M. L. *A finite element model for the prediction of thermal stresses in mass concrete*. University of Florida, 2009; 177.

24. Vladan K., Ljubodrag S., Nikola M. Computation of thermal-stresses and contraction joint distance of RCC dams. *Journal of Thermal Stresses*. 2013; 36: 112-134. DOI: 10.1080/01495739.2013.764795

25. ACI Committee 207 – Mass and thermally controlled concrete. 2017. 30.

26. Fu WQ, Han SF. *Prevention and control of concrete project crack*. In: Han SF, Geng WS, editors. *Control instruction of reinforced concrete structure crack*. Beijing, Chemical Industry Press, 2006; 213-242.

27. Thi My Dung Do, Thanh Quang Khai Lam. Solutions to improve the quality of mass concrete construction in climate conditions of Southern Vietnam. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019; 8(6C2):188-192.

28. Castilho E., Schela N., Tiago C., Farinha M.L.B. FEA model for the simulation of the hydration process and temperature evolution during the concreting of an arch dam. *Engineering Structures*. 2018; 174:165-177. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.07.065

29. Aniskin N., Nguyen T.C. Temperature regime of massive concrete dams in the zone of contact with the base. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:042083. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042083

30. Zhu Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete. *Prin. in the Uni. States of Amer*. 2014; 497. DOI: 10.1016/C2012-0-06038-3

31. Teleshev V.I., Vatin N.I., Marchuk A.N., Komarinskiy M.V. *Production of hydraulic works. part 1*. Moscow, 2012; 485. (rus.).

32. Aniskin N.A., Nguyen Chong Chyk, Bryanskiy I.A., Dam Khyu Khyng. Determination of the temperature field and the thermal stress state of the laid concrete mass using the finite element method. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]*. 2018; 13(11):1407-1418. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.11.1407-1418 (rus.).

33. Nguyen T.C., Pham V.T., Bui A.K. The effects of insulation thickness on temperature field and evaluating cracking in the mass concrete. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2018; 18(2):128-132.

34. Kraynov A.Yu., Min'kov L.L. *Numerical methods for solving heat and mass transfer problems*. Tomsk, 2016; 92. (rus.).

35. Krat T.Yu., Rukavishnikov T.N., Vedeneyeva B.Ye. Assessment of temperature conditions and thermal stress state of spillway blocks under various conditions of concreting. *Vestnik VNIIG*. 2007; 248:77-85. (rus.).

36. Hai T.H., Thuc L.V. The effect of splitting concrete placement on controlling thermal cracking in mass concrete // *Journal of science and technology in civil engineering*. 2017; 11(6):22-28. URL: <http://stce.nuce.edu.vn/index.php/en/article/view/932>

37. Tu A.D., Adrian M.L., Mang T., Michael J.B. Importance of insulation at the bottom of mass concrete placed on soil with high groundwater. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2013; 2342:113-120. DOI: 10.3141/2342-14

38. Ding H., Zhang L., Zhang P., Zhu Q. Thermal and stress analysis of early age concrete for spread footing. *Transactions of Tianjin University*. 2015; 21(6):477-483. DOI: 10.1007/s12209-015-2563-0

39. Zreiki J., Bouchelaghem F., Chaouche M. Early-age behaviour of concrete in massive structures, experimentation and modeling. *Nuclear Engineering and Design*. 2010; 240(10):2643-2654. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2010.07.010

40. Teleshev V.I., Vatin N.I., Marchuk A.N., Komarinskiy M.V. *Production of hydraulic works. part 1*. Moscow, 2012; 485. (rus.).

41. Zhong R., Hou G., Qiang S. An improved composite element method for the simulation of temperature field in massive concrete with embedded cooling pipe. *Applied Thermal Engineering*. 2017; 124:1409-1417. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.124

42. Nguyen T.C., Tang V.L., Bulgakov B.I. Designing the composition of concrete with mineral additives and assessment of the possibility of cracking in cementconcrete pavement. *Materials Science Forum*. 2018; 931:667-673. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.667

43. Seo Ki-Young, Kim Hee-Sung, Jin Chi-Sub. Determination of thermal cracking index of internal restricted mass concrete using a numerical analysis. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*. 2007; 11(1):57-67.

44. Bamforth P.B. *Early-age thermal crack control in concrete*. London, 2007; 268.

45. Eydel'man S.Ya. *Natural study of the concrete dam of the Bratsk HPP*. Leningrad branch, 1975; 293. (rus.).

46. Zhang Xiao-fei, Li Shou-yi, Li Yan-long, Ge Yao, Li Hui. Effect of superficial insulation on roller-compacted concrete dams in cold regions. *Advances in Engineering Software*. 2011; 42(11):939-943. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2011.06.004

47. Lam T.V., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Larsen O.A., Anh P.N. Effect of rice husk ash and fly ash on the compressive strength of high performance concrete. *E3S Web of Conf*. 2018; 33:02030. DOI: 10.1051/e3sconf/20183302030

48. Japan Concrete Institute. Guidelines for control of cracking of mass concrete 2016. *Published by japan concrete institute*. 302.

49. Aniskin N.A., Nguyen T.C., Hoang Q.L. Influence of size and construction schedule of massive

concrete structures on its temperature regime. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:02014. DOI: 10.1051/mateconf/201825102014

50. Abdel-Raheema M., Quintanaa O., Moralesa M., Marroquin-Villaa Y., Ramosa D., Hernandez S. Construction methods used for controlling temperature in mass concrete structures. *Creative Construction Conference*. 2018; 139-146. DOI: 10.3311/CCC2018-019

51. Gajda J., Vangeem M. Controlling temperatures in mass concrete. *Concrete international*. 2002; 1:60-62.

52. Nagataki S., Ono S. State of the art of pre-cooling method for massive concrete. *Concrete Technology*. 1991; 29(12).

53. Sheng-hong Chen, Peifang Su, Isam Shahrour. Composite element algorithm for the thermal analysis of mass concrete Simulation of cooling pipes. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2011; 21(4):434-447. DOI: 10.1108/09615531111123100

54. Zheng W., Pan P., Ye L. Study on thermal stress and temperature cracks control of longlin roller compacted concrete gravity dam. *Applied Mechanics and Materials*. 2012; 212-213:912-916. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.212-213.912

55. Li C., Li Y. Optimization of cooling pipes inside mass concrete bridge pile cap. *The 2nd World Conference on Humanities and Social Sciences*. 2017; 25-30. URL: https://webofproceedings.org/proceedings_series/ESSP/WCHSS%202017/WCHSS005.pdf

56. Liu X., Zhang C., Chang X., Zhou W., Cheng Y., Duan Y. Precise simulation analysis of the thermal field in mass concrete with a pipe water cooling system. *Applied Thermal Engineering*. 2015; 78:449-459. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.050

57. Qiu Y., Zhan G.. Stress and damage in concrete induced by pipe cooling at mesoscopic scale. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017; 9(2):1-17. DOI: 10.1177/1687814017690509

58. Yong-xing Hong, Wen Chen, Ji Lin, Jian Gong, Hong-da Cheng. Thermal field in water pipe cooling concrete hydrostructures simulated with singular boundary method. *Water Science and Engineering*. 2017; 10(2):107-114. DOI: 10.1016/j.wse.2017.06.004

59. Klemczak B., Knoppik A.W.K. Reinforced concrete tank walls and bridge abutments: Early-age behaviour, analytic approaches and numerical models. *Engineering Structures*. 2005. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.11.031

60. Su H., Duan D., Lu Z. Research on crack control of mass concrete structure. *Insight - Civil Engineering*. 2018; 1:11-19. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/ba96/2d396c6b0cf6a279ea36d6c9b89271c11486.pdf>

61. Cheng J., Li T.C., Liu X., Zhao L.H. A 3D discrete FEM iterative algorithm for solving the water pipe cooling problems of massive concrete structures. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2016; 40(4):487-508. DOI: 10.1002/nag.2409

62. Liu X., Zhang C., Chang X., Zhou W., Cheng Y., Duan Y. Precise simulation analysis of the thermal field in mass concrete with a pipe water cooling system. *Applied Thermal Engineering*. 2015; 78(5):449-459. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.050

63. Nguyen T.C., Huynh T.P., Tang V.L. Prevention of crack formation in mass concrete at early age by cooling pipe system. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2019; 20(8):1101-1107. DOI: 10.1007/s42107-019-00175-5

64. Nguyen T.C., Luu X.B. Reducing temperature difference in mass concrete by surface insulation. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 4(88):70-79. DOI: 10.18720/MCE.88.7

65. Yuan-Yuan Chen, Ssu-Yu Chen, Chien-Jou Yang, Hei-Tao Chen. Effects of insulation materials on mass concrete with Pozzolans. *Construction and Building Materials*. 2017; 137:261-271. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.059

66. Nguyen C.T., Aniskin N.A. Temperature regime during the construction massive concrete with pipe cooling. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 89(5):156-166. DOI: 10.18720/MCE.89.13

67. Vasil'yev P.I., Kononov Yu.I., Mal'kevich A.B., Semenov K.V. *Thermal stress state of a massive concrete wall (slab) in the construction period: guidelines for the course project*. St. Petersburg, LSTU, 1991; 32. (rus.).

68. Semenov K.V., Konstantinov I.A., Savchenko A.V., Kokoreva K.A., Nesterov A.A. The effect of temperature effects in the calculations of the thermally stressed state of discretely stacked concrete bodies. *Construction of unique buildings and structures*. 2015; 5(32):18-28. (rus.).

69. Rahimi A., Noorzaei J. Thermal and structural analysis of roller compacted concrete (RCC) dams by finite element code. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011; 5(12):2761-2767.

70. Rtishcheva A.S. *Theoretical foundations of hydraulics and heat engineering : study guide*. Ulyanovsk, UIGTU, 2007; 171. (rus.).

71. Frid S.A. *Temperature stresses in concrete and reinforced concrete structures of hydraulic structures*. Moscow, 1959; 72. (rus.).

72. Bushmanova A.V., Barabanshchikov Yu.G., Semenov K.V., Struchkova A.Ya., Manovitskiy S.S. Thermal crack resistance of massive foundation slabs during the construction period. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 8(76):193-200. (rus.).

73. Bushmanova A.V., Videnkov N.V., Semenov K.V., Barabanshchikov Yu.G., Dernakova A.V., Korovina V.K. Thermal stress state of massive concrete structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2017; 3(71):51-60. (rus.).

74. Aniskin N., Nguyen T.C. Influence factors on the temperature field in a mass concrete. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199705021

75. Nguyen Mini Viyet. *Study of solutions to reduce the thermal stress state of rolled concrete dam in Vietnam* : thesis. ... ph.D. Hanoi Water University, 2017; 153.
76. Conrad M., Morris D., Steiger K. Thermal stress analysis of the son la dam during its construction. *ICOLD Hanoi Symposium*. 2010.
77. Vo Van Lung, Dang Kuok Daj. *Research on thermally stressed state of rolled concrete dams (Quangnam Province)*. Design Project Report. Hanoi, Institute of Irrigation Design, 2010; 17.
78. Jaafara M.S., Bayagoob K.H., Noorzaei J., Waleed A.M.T. Development of finite element computer code for thermal analysis of roller compacted concrete dams. *Advances in Engineering Software*. 2007; 38(11-12):886-895. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2006.08.040
79. Ginzburg S.M., Rukavishnikova T.N., Sheynker N.Ya. Simulation models for assessing the temperature regime of a concrete dam using the example of the Bureyskaya HPP. *Proceedings VNIIG. B.E. Vedeneeva*. 2002; 241:173-178. (rus.).
80. Ginzburg S.M., Rukavishnikova T.N., Sheynker N.Ya. The use of simulation models to identify the temperature parameters of concrete massifs from the construction stage. *Proceedings VNIIG. B.E. Vedeneeva*. 2002; 241:240. (rus.).
81. Krat T.Yu., Rukavishnikova T.N., Vedeneyeva B.Ye. Assessment of temperature conditions and thermal stress state of spillway blocks under various conditions of concreting. *Proceedings VNIIG. B.E. Vedeneeva*. 2007; 248:77-85. (rus.).
82. Chen H., Liu Z.. Temperature control and thermal-induced stress field analysis of gongguoqiao RCC dam. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018; 11. DOI: 10.1007/s10973-018-7450-1
83. Aniskin N.A., Nguyen T.C. Temperature regime and thermal stress in a concrete massif with pipe cooling. *Power Technology and Engineering*. 2019; 52(6):638-643. DOI: 10.1007/s10749-019-01009-9

Received September 27, 2019.

Adopted in a revised form on November 8, 2019.

Approved for publication February 27, 2020.

BIONOTES: **Nikolay A. Aniskin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Hydraulics and hydraulic engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 260568; aniskin@gic.mgsu.ru;

Nguyen Trong Chuc — postgraduate student, Department “Hydraulics and hydraulic engineering”, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 956450; hydraulics@gic.mgsu.ru.

О гидравлическом сопротивлении при гидроабразивной резке

Л.В. Волгина¹, И.А. Гусев²

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

² Академия Государственной противопожарной службы МЧС России (Академия ГПС МЧС России); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Движение двухфазного потока представляет собой сложный процесс, на который оказывают влияние многие факторы. Характеристики движения потока могут зависеть как от физических свойств движущейся среды, так и от свойств трубопровода, скоростей движения потока и др. Изучение новых видов гидравлических систем позволяет установить параметры, характеризующие происходящие при их транспортировке процессы, особенно если рассматривается сложный поток (смесь воды и абразивных частиц). Цель исследования — установление коэффициента гидравлического сопротивления при транспортировании двухфазного потока в виде смеси воды и абразива.

Материалы и методы. Использованы физический эксперимент, методы математической обработки полученных данных, их описание.

Результаты. Определили коэффициент гидравлического сопротивления при транспортировании смеси, а также параметры, характеризующие дополнительные потери напора при транспортировании абразива. На основании экспериментального исследования удалось установить предельные дальности подачи для воды и смеси, которые составили, соответственно, 317 и 290 м.

Выводы. Полученные результаты явились следствием выявления особенностей потерь давления при транспортировании смеси и коэффициентов, его характеризующих. Рассматриваемые потоки применяются в системах, параметры которых во многом отличны от параметров традиционной гидравлики, в связи с чем полученные теоретические результаты должны быть проверены экспериментально. В дальнейшем необходимо изучить подобные системы с иными параметрами, чтобы установить зависимости потерь давления от расхода и количества абразива. Практическая значимость исследования состоит в том, что были определены максимальные дальности транспортировки и подачи воды и смеси, при которых сохраняются рабочие параметры систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидроабразивная резка, двухфазный поток, измерительный комплекс, система высокого давления, абразивная среда, потери напора, скорость потока, гидросмесь

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Волгина Л.В., Гусев И.А. О гидравлическом сопротивлении при гидроабразивной резке // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 3. С. 399–408. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.399-408

Hydraulic resistance accompanying waterjet cutting

L.V. Volgina¹, I.A. Gusev²

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

² Academy of the State Fire Service of the Emercom of Russia (Academy of GPS of the MES of Russia); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Two-phase flow transmission is a complex process exposed to the influence of numerous factors. Its characteristics may depend on the physical properties of a flowing medium and on the properties of a pipeline, flow velocities, etc. A research into new types of hydraulic systems serves to identify the parameters that characterize the processes that accompany their transmission, especially if a multi-component flow is analyzed (a mix of water and abrasive particles). The mission of the research is to identify the value of hydraulic resistance coefficient in the course of transmission of a two-phase flow, or a mix of water and an abrasive. Materials and methods. A physics experiment, mathematical data processing methods, data description.

Results. The co-authors have identified the hydraulic resistance coefficient value in the course of the mix transmission, as well as the parameters characterizing supplementary pressure losses in the course of the abrasive transmission. The experimental research enabled the co-authors to identify maximal water and mix application distances that reach 317 and 290 meters.

Conclusions. The results, obtained by the co-authors, are the consequence of the pressure losses that occur in the course of mix transmission and the coefficients that characterize it. The flows considered in the article are used in the systems whose parameters are considerably different from those of traditional hydraulic engineering systems; therefore, any theoretical results obtained by the co-authors need experimental verification. Further, similar systems having different parameters must also be exposed to research to identify the relation between the pressure loss and the abrasive consumption rate and amount. The practical value of the research consists in the identification of maximal water and mix transmission and application distances providing that the operating parameters of the systems remain unchanged.

KEYWORDS: waterjet cutting, two-phase flow, measurement system, high pressure system, abrasive medium, pressure loss, flow velocity, hydraulic fluid

FOR CITATION: Volgina L.V., Gusev I.A. Hydraulic resistance accompanying waterjet cutting. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(3):399-408. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.399-408 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

При транспортировке различных веществ по трубопроводам возникают потери напора. На потери напора оказывают влияние многие факторы — начиная от физических свойств потока и заканчивая характеристиками самого трубопровода. При рассмотрении многофазных потоков появляются дополнительные потери напора в результате взаимодействия фаз их переноса. Для установления значений потерь напора и определения коэффициентов, характеризующих эти потери в двухфазном потоке, представляющим смесь воды и абразивных частиц, были проведены экспериментальные исследования.

Гидроабразивная резка как инструмент применяется на сегодняшний день во многих системах и даже сферах деятельности [1, 2]. Нашла она свое применение и в пожаротушении. Движение потока при гидроабразивной резке — это движение двухфазного потока, содержащего в своем составе твердую фазу (смесь частиц абразива Mg , Fe_2SiO_4 — 62–76 %, Fe , Al , Ca , SiO_2 20–35 %, Fe_3O_4 — 1–2 %) не более 4 % от объема воды и жидкую (вода). Особенностью такого потока является также то, что средняя скорость — достаточно высокая для природных и инженерных потоков (находится приблизительно в диапазоне от 6 до 8 м/с) [3–9].

Согласно данным статистики, большинство современных пожаров происходит в помещениях, представляющих замкнутое пространство (квартиры, ангары, отсеки и др.). Современная отделка многих помещений зданий и сооружений изготовлены с применением полимерных материалов, имеющие более высокую теплоту сгорания и при достаточной вентиляции — высокий уровень выделения тепла по сравнению с традиционными материалами.

Использование в помещениях стеклопакетов, герметичных дверей сохраняет вероятность того, что пожар перейдет в режим, когда для горения бу-

дет недостаточно только кислорода. Такие пожары чреваты возникновением опасных явлений, связанных с выбросом пламени, что служит причиной травм и распространением пожара.

Для минимизации возникновения опасных явлений и эффективного тушения пожара разработаны системы пожаротушения с возможностями гидроабразивной резки, которые позволяют осуществлять подачу огнетушащих веществ в горящий замкнутый объем, не нарушая его целостности.

Эффективность пожаротушения достигается путем насыщения горящего объема водой в распыленном состоянии (средний диаметр капель не превышает 200 мкм), которая, попадая в зону с высокой температурой, испаряется, тем самым отводя от зоны горения значительное количество тепловой энергии [10–12].

Рассматриваемый метод пожаротушения в последнее время все активнее внедряется, но его эффективность зависит от многих факторов, один из них — напор перед стволом (распылительной форсункой), от которого зависит как степень резания конструкций, так и формирование капель определенной величины.

Подача огнетушащих веществ проводится по рукавным линиям, как известно, при этом возникают потери напора. В связи с этим возникает задача, при каком максимальном удалении от насосной установки возможна подача огнетушащих веществ в виде воды и смеси воды и абразивных частиц и как происходят потери напора, ведь скорости потока и рабочее давление систем пожаротушения с гидроабразивной резкой достаточно высоки (рабочее давление 30 МПа). От определения указанных особенностей во многом будет зависеть тактика применения систем пожаротушения.

Потери напора при транспортировке зависят от скорости потока, его вязкости, характеристик трубопровода и др. А вязкость двухфазного потока,

в свою очередь, зависит в том числе и от характеристик твердых частиц. Совокупность данных параметров во многом характеризует коэффициент гидравлического трения, который для рассматриваемых систем недостаточно изучен.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования потерь напора экспериментальным путем был разработан измерительный комплекс, некоторые элементы которого представлены на рис. 1.



Рис. 1. Рукавные вставки с разделителями сред, клапанными блоками и датчиками давления

Fig. 1. Hose inserts having media separators, valve blocks and pressure sensors

Основные характеристики измерительного комплекса:

- измерения давления от 0 до 40 МПа;

- диапазон температур рабочей среды от -30 до 200 °С;
- возможность проведения исследований при температурах окружающего воздуха от -5 до 40 °С;
- возможность работы с абразивными средами.

Для определения значений потерь давления при транспортировке и подаче огнетушащих веществ в виде воды и смеси была собрана схема, представленная на рис. 2.

Техническое оснащение эксперимента представлено в табл. 1.

Фиксация значений избыточного давления осуществлялась в начале линии, в непосредственной близости от насосной установки и в ее конце — перед стволом (рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Потери напора подразделяются на местные и потери напора по длине. В обоих случаях причиной возникновения потерь напора является сила вязкости, при потерях напора по длине $h_{\text{д}}$ энергия тратится на преодоление сопротивлений при трении о поверхность трубопровода. Местные потери напора $h_{\text{м}}$ возникают на участках, где происходят деформации потока и обуславливаются затратами энергии на восстановление (вследствие деформации) в вязких потоках распределения скоростей [13–15].

Суммарные потери напора $h_{\text{общ}}$ определяются следующим соотношением:

$$h_{\text{общ}} = h_{\text{д}} + \sum h_{\text{м}}. \quad (1)$$

В отличие от простых систем, в которых в основном транспортируется вода, в системах пожаротушения и гидроабразивной резки происходит транспортировка смеси воды и абразивных частиц,

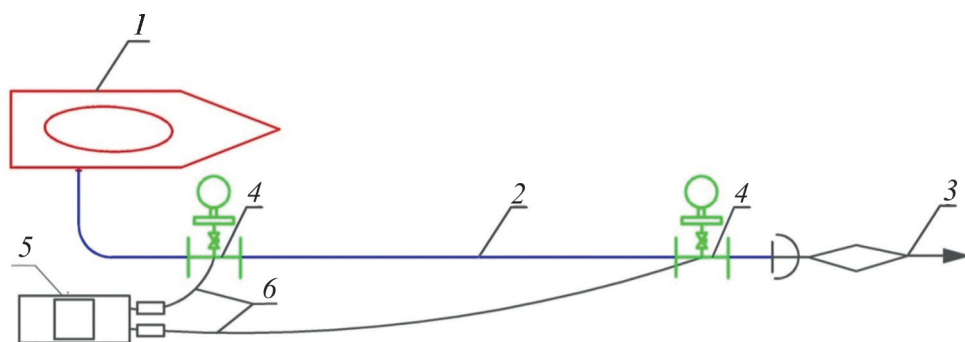


Рис. 2. Схема проведения экспериментального исследования: 1 — пожарный автомобиль с установкой пожаротушения и гидроабразивной резки; 2 — рукавная линия диаметром 12 мм и длиной 80 м; 3 — специализированный ручной ствол; 4 — рукавные вставки для фиксации значений избыточного давления; 5 — многоканальный регистратор РТМ-59; 6 — соединительные кабели

Fig. 2. Schematic representation of an experiment: 1 — a fire truck with a fire extinguishing installation and a water jet machine; 2 — a hose line, diameter — 12 mm, length — 80 m; 3 — a specialized hand-held branch; 4 — hose inserts for excess pressure registration; 5 — multichannel recorder RTM-59; 6 — connection cables

Табл. 1. Перечень оборудования, задействованного в ходе проведения экспериментального исследования

Table 1. List of equipment used in the course of an experiment

Наименование оборудования / Item of equipment	Назначение / Equipment purpose	Количество / Number of items
Пожарная автоцистерна с установкой «Кобра» / Fire tank truck and Cobra unit	Подача огнетушащих веществ / Extinguishing agent application	1 ед. / One
Катушка со специализированным рукавом / Hose reel TRELLERBORG-TRELLJET 580-HD 13 -1/2// - HP 500 BAR /7350 PSI-MAX 150	Транспортировка огнетушащих веществ / Transmission of extinguishing agents	1 шт., длина 80 м / One, length — 80 m
Манометры высокого давления АИР-20 -/М2-Н/ ДИ/ 190/-/12N / High pressure gauges AIR-20-/ M2-N/ DI/ 190/-/12N	Измерение и фиксация значений избыточного давления / Excess pressure detection and registration	2 шт. / Two
Многоканальный регистратор PMT 59 / Multi-channel recorder RTM-59	Запись и визуализация в режиме реального времени показаний манометров избыточного давления / Recording and visualization of excess pressure in the real-time mode	1 шт. / One
Рукавные вставки для фиксации значений избыточного давления / Hose inserts for excess pressure registration	Включение в процесс подачи огнетушащих веществ и измерение давления / Integration into extinguishing agent application and pressure measurement processes	2 шт. / Two
Резервуар с абразивом / Abrasive product tank	Дозирование в насосно-рукавные системы абразива для формирования гидросмеси / Dosed abrasive feed into the pumper system for the hydraulic fluid to be produced	10 кг / 10 kg
Рулетка со стальной лентой / Steel tape	Измерение размеров / Sizing	1 шт. / One
Штангенциркуль / Beam compass	То же / Same as above	1 шт. / One
Фото- видеоаппаратура / Photo and video cameras	Фиксация эксперимента / Experiment recording	1 шт. / One
Боевая одежда пожарного / Fire entry suit	Обеспечение безопасности / Safety assurance	6 шт. / Six



Рис. 3. Измерение избыточного давления в начале и в конце трубопровода

Fig. 3. Excess pressure detection at pipeline starting and end points

что способствует появлению дополнительных потерь, связанных с переносом твердых частиц, это выражаются уравнением (2) [16]:

$$i_{\text{см}} = i_0 \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_0} + \Delta i, \quad (2)$$

где i_0 — удельные потери напора при движении воды, м; $\rho_{\text{см}}$ — плотность смеси; ρ_0 — плотность воды; Δi — дополнительные потери напора, м.

При подсчете дополнительных потерь Δi можно использовать следующее уравнение [17]:

$$\Delta i = \delta \sqrt[4]{j^3} \sqrt{C_0^2} \frac{V_{\text{кр}}}{V}, \quad (3)$$

где δ — коэффициент, который учитывает отношение размеров частиц к размерам трубопровода (диаметру) d/D ; j — коэффициент разнозернистости твердых частиц; C_0 — действительная объемная консистенция, Н/м³; $V_{\text{кр}}$ — критическая скорость потока, при которой частицы начинают отрываться от дна и переноситься им, м/с; V — скорость движения потока, м/с.

Минимальную скорость, при которой поток воды может транспортировать твердые частицы, называют критической скоростью и определяют по формуле:

$$V_{кр} = 8,3\sqrt[3]{D^6 \sqrt{C_0 \psi^*}}, \quad (4)$$

где D — диаметр трубы, м; ψ^* — коэффициент транспортабельности, характеризующий способность твердых частиц транспортироваться потоком воды, который является функцией гидравлической крупности $\psi^* = f(W)$.

Основные кинематические характеристики и расчетные формулы рассматриваемого двухфазного потока приведены в табл. 2.

Величина потерь напора по воде i_0 характеризует потери напора при транспортировке смеси $i_{см}$ и зависит от особенностей движения воды [18, 19] и поверхности трубопровода, по которому происходит движение, что учитывается коэффициентом гидравлического трения λ .

Учитывая рабочие параметры установки пожаротушения с гидроабразивной резкой и ее технические особенности (диаметр внутреннего сечения рукава 12 мм), можно заключить, что в инженерной гидравлике вопрос, связанный с определением коэффициента гидравлического трения в рассматриваемых системах, является довольно сложным.

Табл. 2. Основные характеристики потока

Table 2. Basic characteristics of the flow

№	Величина / The characteristic	Расчетная формула / The formula	Значение / The value	Примечание / The note
1	Средневзвешенная крупность твердых частиц d , мм / Average weighted diameter of solid particles, d , mm	—	0,3–0,8	Исходя из параметров установки / To be identified on the basis of pre-set parameters
2	Коэффициент разнородности $J(-)$ / Non-homogeneity ratio $J(-)$	—	2	Ситовый анализ / Particle size analysis
3	Средневзвешенная плотность твердых частиц $\rho_{тв}$, г/см ³ / Average weighted density of solid particles ρ_{solids} , g/cm ³	$\rho_{solids} = \frac{\sum \rho_i \cdot n}{100 \%}$	4,34	ρ_i — плотности твердых частиц; n — % содержание твердых частиц в составе абразива / ρ_i — solid particles density values; n — % content of solid particles in the abrasive
4	Действительная плотность потока $\rho_{см}$, г/см ³ / Absolute flow density ρ_{mix} , g/cm ³	$\rho_{см} = \frac{\int_{\omega} \rho_i \cdot u_i d\omega}{u_{ср} \omega}$ $\rho_{mix} = \frac{\int_{\omega} \rho_i \cdot u_i d\omega}{u_{crit} \omega}$	1,14	ρ_i и u_i — соответственно плотность и скорость локальные, определяемые для каждой части живого сечения (сегмента) / ρ_i and u_i — local density and velocity, identified for each flow section area (segment)
5	Расход потока $Q_{см}$, м ³ /с / Flow rate Q_{mix} , cm ³ /sec	$Q_{см} = \frac{W_{см}}{\omega}$ $Q_{mix} = \frac{W_{mix}}{\omega}$	1,066	Объем смеси, протекающий через сечение трубы за единицу времени / Mix amount flowing through the pipeline section per unit of time
6	Средняя скорость потока $V_{см}$, см/с / Average flow velocity $V_{см}$, cm/sec	$V_{см} = \frac{Q_{см}}{\omega}$ $V_{mix} = \frac{Q_{mix}}{\omega}$	943,6	ω — площадь трубы 1,13 см ² (D — 12 мм) / ω — pipeline area 1.13 cm ² (D — 12 mm)
7	Действительная объемная консистенция потока $C_0, (-)$ / Absolute flow consistency $C_0, (-)$	$C_0 = \frac{\rho_{см} - \rho}{\rho_m - \rho}$ $C_0 = \frac{\rho_{mix} - \rho}{\rho_m - \rho}$	0,04	ρ — плотность воды / ρ — water density

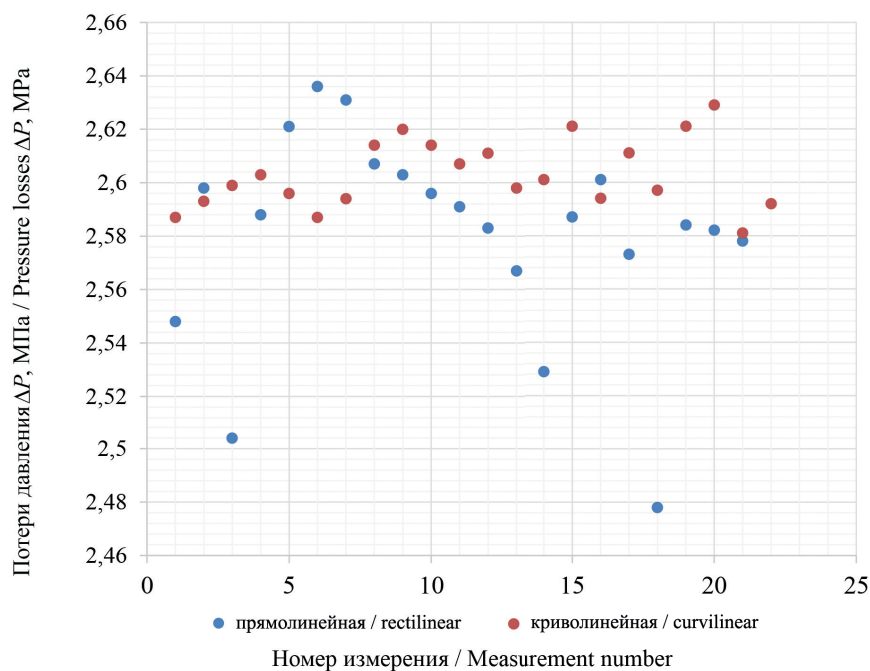


Рис. 4. Результаты измерений потерь давления при подаче смеси при прямолинейной и криволинейной прокладке рукавной линии

Fig. 4. Pressure loss measurement results in case of mix application using rectilinear and curvilinear hose lay patterns

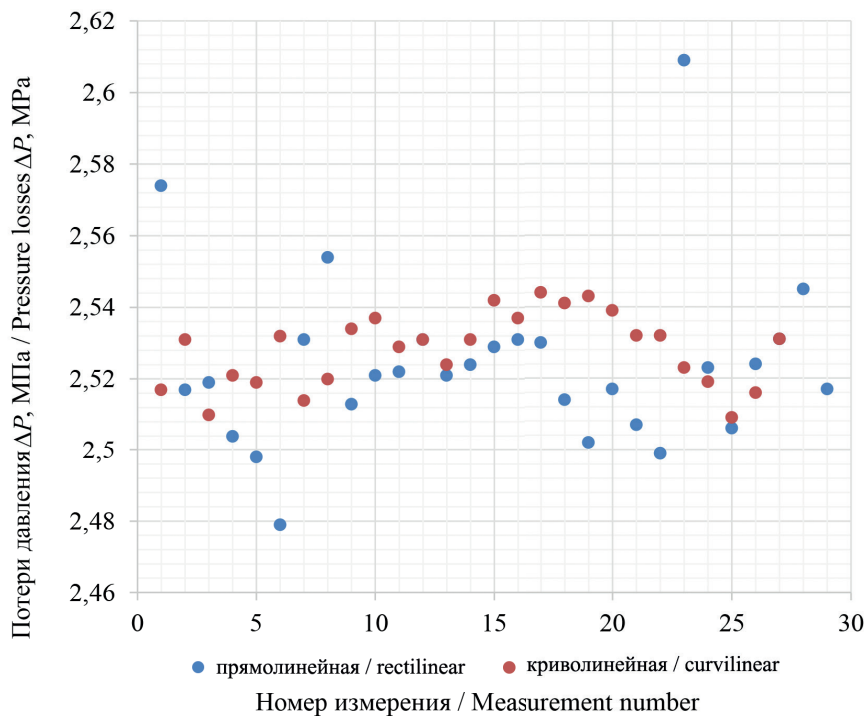


Рис. 5. Результаты измерений потерь давления при подаче воды при прямолинейной и криволинейной прокладке рукавной линии

Fig. 5. Pressure loss measurement results in case of water application using rectilinear and curvilinear hose lay patterns

Местные потери напора выражаются формулой (5) [19, 23]:

$$h_m = \xi_m \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{\rho_{см}}{\rho}, \quad (5)$$

где ξ_m — коэффициент, характеризующий местные сопротивления; $\rho_{см}$ — плотность смеси, кг/м³; ρ — плотность воды, кг/м³.

Определение избыточного давления осуществлялось при прокладке рукавной линии прямолинейно и с искривлениями, для того чтобы создать местные сопротивления и приблизить условия эксплуатации к реальным [20]. Были проведены эксперименты для чистой воды и для смеси. Результаты измерения потерь давления представлены на рис. 4–6.

Таким образом, получена информация о дополнительных потерях энергии, связанных с наличием твердых частиц Δi .

Основной формулой для определения потерь напора по длине служит формула Дарси — Вейсбаха, которая имеет вид:

$$h_L = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (6)$$

где λ — коэффициент гидравлического трения; l — длина трубопровода, м; d — диаметр сечения трубопровода, м; V — средняя скорость потока жидкости, м/с; g — ускорение свободного падения, м/с².

Коэффициент λ не является постоянной величиной и зависит от шероховатости стенок трубопровода и числа Рейнольдса.

В свою очередь, состав потока во многом оказывал влияние на потери напора, что отражено на рис. 6.

Средние значения по потерям давления при транспортировке воды и смеси представлены в табл. 3.

На основе полученных экспериментальных данных и исходя из уравнения Дарси — Вейсбаха



Рис. 7. Исследование местных сопротивлений (поворот на 90 и 180°)

Fig. 7. A study of local resistances (quarter and half turns)

определен коэффициент гидравлического трения, значение которого составило 0,019. Коэффициент местных сопротивлений — 0,45, поскольку местное сопротивление создано путем образования нескольких поворотов на 90 и 180° (рис. 7).

Таким образом, коэффициент местных сопротивлений, полученный по итогам расчета в табл. 2, есть сумма шести местных сопротивлений (плавные повороты на 90 и 180°):

$$\xi_{\Sigma} = 2\xi_{\text{поворот на } 90} + 4\xi_{\text{поворот на } 180} = 10\xi_{\text{поворот на } 90}.$$

Следовательно, коэффициент местных сопротивлений для рукавной линии, тип сопротивления — плавный поворот на 90°, составил 0,04.

Далее были определены расходы системы при критической и средней скорости потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Движение двухфазного потока представляет собой сложный процесс, на который оказывают влияние многие факторы. Характеристики движения потока могут зависеть как от физических свойств

Табл. 3. Полученные экспериментальные данные

Table 3. Experimental findings

Вид потока / Flow type	Вид прокладки / Hose lay	Потери давления, МПа / Pressure losses, MPa	Коэффициент гидравлических сопротивлений λ / Hydraulic resistances coefficient λ	Местные потери давления, МПа / Local pressure losses, MPa	Коэффициент местных сопротивлений ξ_m / Local resistances coefficient
Вода / Water	Прямолинейная / Rectilinear	2,52386	0,018	—	—
Смесь / Mix	Прямолинейная / Rectilinear	2,58024	0,019	—	—
Вода / Water	Криволинейная / Curvilinear	2,52807	—	0,00421	0,09
Смесь / Mix	Криволинейная / Curvilinear	2,60318	—	0,02294	0,45

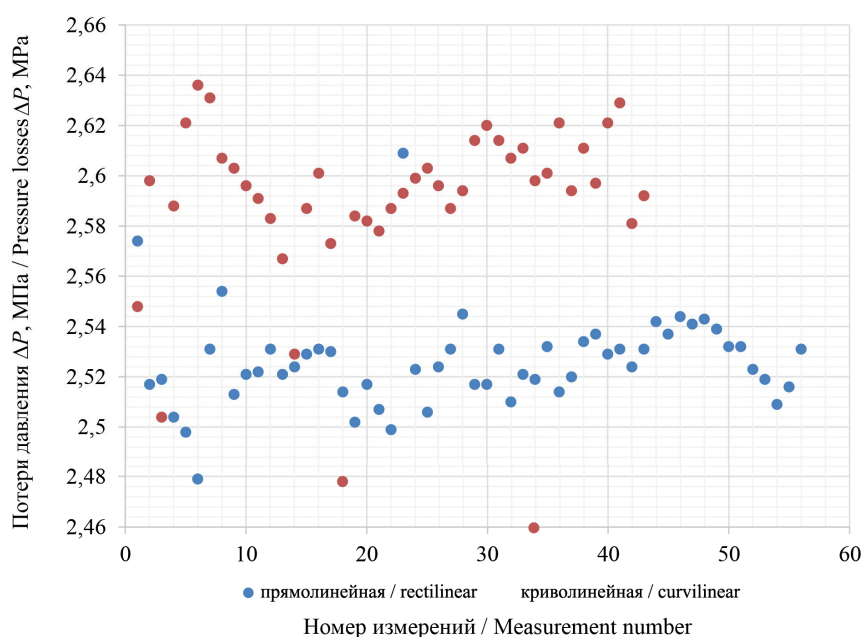


Рис. 6. Результаты измерений потерь давления при подаче воды и смеси в горизонтальной плоскости при прямолинейной прокладке

Fig. 6. Pressure loss measurement results in case of water and mix application in a horizontal plane using the rectilinear hose lay pattern

движущейся среды, так и от свойств трубопровода, скоростей движения потока и др.

В связи с этим достаточно тяжело определить особенности движущегося потока, тем более оценить его экономические возможности. Но благодаря научным и экспериментальным исследованиям удастся установить характеристики потока, которые в дальнейшем позволяют его просчитывать и на основании этих расчетов производить проектирование и эксплуатацию инженерных систем.

Данная статья представляет результаты экспериментальных исследований потерь напора двухфазного потока, состоящего из воды и твердых абразивных частиц. По полученным экспериментальным и расчетным данным удалось установить значение дополнительных потерь, возникающих

при транспортировке твердых частиц, оно составляет около 0,0056 м с одного метра рукавной линии.

Расчетное значение потерь напора при транспортировке смеси составило 3,1836 м с одного метра рукавной линии. Общее значение потерь напора на всем участке рукавной линии (с учетом плотности смеси) — 2,736 МПа, что согласуется с данными, полученными экспериментальным путем. Но для определения более точных значений гидравлических характеристик рассматриваемых систем в дальнейшем планируется провести еще не одну серию экспериментов.

На данный момент на основании полученных результатов были определены дальности подачи огнетушащих веществ, значение которых для воды составило 317 м, для смеси — 290 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гергель В.И., Мешалкин Е.А. Пожаротушение тонкораспыленной водой высокого давления // Пожаровзрывобезопасность. 2017. Т. 26. № 3. С. 45–49. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03.45-49
2. Карпышев А.В., Душкин А.Л., Глухов И.С., Сегаль М.Д. Использование тонкораспыленной воды для повышения противопожарной защиты

атомных электростанций // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2006. № 5. С. 34–44.

3. Алешков М.В., Гусев И.А., Холостов А.Л. Определение тактических возможностей установок пожаротушения с гидроабразивной резкой при подаче огнетушащих веществ на объектах энергетики // Пожары и чрезвычайные ситуации:

предотвращение, ликвидация. 2018. № 2. С. 29–34. DOI: 10.25257/FE.2018.2.29-35

4. Gsell J. Assessment of fire suppression capabilities of water mist. Fighting Compartment Fires with the Cutting Extinguisher. University of Ullster, 2010. 138 p.

5. Liao W., Deng X. Study on Flow Field Characteristics of Nozzle Water Jet in Hydraulic cutting // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 81. P. 012167. DOI: 10.1088/1755-1315/81/1/012167

6. Li D.Q. A technology to extract coal mine gas using thin sub-layer mining with hydraulic jet // International Journal of Oil, Gas and Coal Technology. 2016. Vol. 12. Issue 1. P. 1. DOI: 10.1504/ijogct.2016.075852

7. Gibilaro L., Gallucci K., Di Felice R., Pagliai P. On the apparent viscosity of a fluidized bed // Chemical Engineering Science. 2007. № 62. Issue 1–2. P. 294–300. DOI: 10.1016/j.ces.2006.08.030

8. Bayer I.S., Megaridis C.M. Contact angle dynamics in droplets impacting on flat surfaces with different wetting characteristics // Journal of Fluid Mechanics. 2006. Vol. 558. P. 415. DOI: 10.1017/s0022112006000231

9. Song D., Wang E., Liu Z., Liu X., Shen R. Numerical simulation of rock-burst relief and prevention by water-jet cutting // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014. Vol. 70. P. 318–331. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.05.015

10. Алешков М.В., Гусев И.А. Обеспечение технологии пожаротушения в замкнутых объемах помещений объектов энергетики // Системы безопасности : мат. 26-й Междунар. науч.-практ. конф. 2017. № 26. С. 176–179.

11. Денисов А.С., Казанский М.А., Сазанов И.И. Способы подачи абразива и гидроабразивном резании // Главный механик. 2014. № 12. С. 44–49.

12. Adelman B., Ngo C., Hellmann R. High aspect ratio cutting of metals using water jet guided laser // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 80. No 9–12. Pp. 2053–2060. DOI: 10.1007/s00170-015-7161-8

13. Shahid A., Uijtewaal W.S.J. Flow Resistance of Vegetated Weirlike Obstacles during High Water Stages // Journal of Hydraulic Engineering. 2013. Vol. 139. Issue 3. P. 325–330. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000671

14. Berzi D., Larcan E. Flow Resistance of Inertial Debris Flows // Journal of Hydraulic Engineering. 2013. Vol. 139. Issue 2. P. 187–194. DOI: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000664

15. Hotta N., Miyamoto K. Phase classification of laboratory debris flows over a rigid bed based on the relative flow depth and friction coefficient // International Journal of Erosion Control Engineering. 2008. Vol. 1. Issue 2. P. 54–61. DOI: 10.13101/ijece.1.54

16. Волгина Л.В., Медзвелья М.Л., Чемерис О.Г. Влияние мелкодисперсных включений на расчет критической скорости двухфазного потока // Вестник МГСУ. 2014. № 11. С. 145–153.

17. Volgina L.V., Sergeev S.A., Romanova A.A. On the Kinematic Characteristics of Mudflows // Power Technology and Engineering. 2019. Vol. 52. Issue 6. Pp. 675–679. DOI: 10.1007/s10749-019-01012-0

18. Berzi D., Di Prisco C.G., Vescovi D. Constitutive relations for steady, dense granular flows // Physical Review E. 2011. Vol. 84. Issue 3. DOI: 10.1103/physrev.84.031301

19. Mitarai N., Nakanishi H. Velocity correlations in dense granular shear flows: Effects on energy dissipation and normal stress // Physical Review E. 2007. Vol. 75. Issue 3. DOI: 10.1103/physrev.75.031305

Поступила в редакцию 27 ноября 2019 г.

Принята в доработанном виде 18 декабря 2019 г.

Одобрена для публикации 27 февраля 2020 г.

О Б АВТОРАХ: Людмила Всеволодовна Волгина — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3032-5165, Scopus: 57208499016; VolginaLV@mgsu.ru;

Иван Александрович Гусев — кандидат технических наук, преподаватель кафедры пожарной техники в составе УНК ПАСТ по научной работе; Академия государственной противопожарной службы МЧС России (Академия ГПС МЧС России); 123366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4; ivan.gusev.92@inbox.ru.

REFERENCES

1. Gergel V.I., Meshalkin E.A. Fire extinguishing by finely-dispersed water of high pressure. *Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(3): 45–49. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.03.45-49 (rus.).

2. Karpyshev A.V., Dushkin A.L., Glukhov I.S., Segal' M.D. Use of fine water to improve fire protection

of nuclear power plants. *Safety and Emergency Issues*. 2006; 5:34-44. (rus.).

3. Gusev I.A., Aleshkov M.V., Holostov A.L. Determination of tactical capabilities of fire extinguishing installations with waterjet cutting when applying fire extinguishing agents at energy facilities. *Fires and emer-*

gencies: prevention, elimination. 2018; 2:29-34. DOI: 10.25257/FE.2018.2.29-35 (rus.).

4. Gsell J. *Assessment of fire suppression capabilities of water mist*. Fighting Compartment Fires with the Cutting Extinguisher. University of Ullster, 2010; 138.

5. Liao W., Deng X. Study on Flow Field Characteristics of Nozzle Water Jet in Hydraulic cutting. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 81:012167. DOI: 10.1088/1755-1315/81/1/012167

6. Li D.Q. A technology to extract coal mine gas using thin sub-layer mining with hydraulic jet. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*. 2016; 12(1):1. DOI: 10.1504/ijogct.2016.075852

7. Gibilaro L., Gallucci K., Di Felice R., Pagliai P. On the apparent viscosity of a fluidized bed. *Chemical Engineering Science*. 2007; 62(1-2):294-300. DOI: 10.1016/j.ces.2006.08.030

8. Bayer I.S., Megaridis C.M. Contact angle dynamics in droplets impacting on flat surfaces with different wetting characteristics. *Journal of Fluid Mechanics*. 2006; 558:415. DOI: 10.1017/s0022112006000231

9. Song D., Wang E., Liu. Z., Liu X., Shen R. Numerical simulation of rock-burst relief and prevention by water-jet cutting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014; 70:318-331. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.05.015

10. Aleshkov M.V., Gusev I.A. Provision of fire extinguishing technology in confined spaces of energy facilities. *Security system*. 2017; 26:176-179. (rus.).

11. Denisov A.S., Kazanskij M.A., Sazanov I.I. Means to deliver abrasive during water jet cutting. *The Chief Mechanical Engineer*. 2014; 12:44-49. (rus.).

12. Adelmann B., Ngo C., Hellmann R. High aspect ratio cutting of metals using water jet guided laser.

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015; 80:9-12:2053-2060. DOI: 10.1007/s00170-015-7161-8

13. Shahid A., Uijtewaal W.S.J. Flow Resistance of Vegetated Weirlike Obstacles during High Water Stages. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2013; 139(3):325-330. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000671

14. Berzi D., Larcen E. Flow Resistance of Inertial Debris Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2013; 139(2):187-194. DOI: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000664

15. Hotta N., Miyamoto K. Phase classification of laboratory debris flows over a rigid bed based on the relative flow depth and friction coefficient. *International Journal of Erosion Control Engineering*. 2008; 1(2): 54-61. DOI: 10.13101/ijece.1.54

16. Volgina L.V., Medzveliia M.L., Chemeris O.G. Effect of fine-dispersed inclusions on the critical velocity analysis in the two-phase flow. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2014; 11:145-153. (rus.).

17. Volgina L.V., Sergeev S.A., Romanova A.A. On the Kinematic Characteristics of Mudflows. *Power Technology and Engineering*. 2019; 52(6):675-679. DOI: 10.1007/s10749-019-01012-0

18. Berzi D., Di Prisco C.G., Vescovi D. Constitutive relations for steady, dense granular flows. *Physical Review E*. 2011; 84(3). DOI: 10.1103/physreve.84.031301

19. Mitarai N., Nakanishi H. Velocity correlations in dense granular shear flows: Effects on energy dissipation and normal stress. *Physical Review E*. 2007; 75(3). DOI: 10.1103/physreve.75.031305

Received November 27, 2019.

Adopted in a revised form on December 18, 2019.

Approved for publication February 27, 2020.

BIONOTES: **Lyudmila V. Volgina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3032-5165, Scopus: 57208499016; VolginaLV@mgsu.ru;

Ivan A. Gusev — Candidate of Technical Sciences, Teacher of the Department of Fire Engineering as part of UNC PASTE on scientific work; **Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia (Academy of GPS of the MES of Russia)**; 4 Boris Galushkin st., Moscow, 123366, Russian Federation; ivan.gusev.92@inbox.ru.

Изучение процесса появления дурно пахнущих запахов в канализационных сетях и анализ средств их удаления

В.А. Орлов, А.В. Саймулло, О.В. Мельник

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены процессы появления в подсводной части безнапорных канализационных сетей (каналов) дурно пахнущих запахов и их эффективное устранение физико-химическими, биологическими, каталитическими, термическими, электроразрядными, строительными и другими методами.

Материалы и методы. Проанализированы литературные источники, исследованы наиболее перспективные методы фиксации (оценки присутствия и контроля интенсивности) дурно пахнущих запахов соответствующей аппаратурой, рассмотрены возможные пути удаления или снижения интенсивности запахов и мероприятия по эффективному устранению причин появления запахов и сохранения микроклимата канализационных сооружений.

Результаты. Выявлены причины возникновения дурно пахнущих запахов в самотечных трубопроводах системы канализации и ряд негативных факторов, способствующих появлению газов. Приведен обзор методов и технологий по предотвращению анаэробных условий в канализационных сетях. Описаны примеры ситуаций, сложившихся в некоторых городах мира в связи с появлением дурно пахнущих веществ в системах водоотведения, и меры борьбы с ними в конкретной обстановке. Представлены конкретные мероприятия по борьбе с запахами с помощью различных методов, применяемых в некоторых странах мира.

Выводы. Практическая реализация ряда мероприятий по устранению неприятных запахов в водоотводящих сетях является дорогостоящей задачей как по капитальным, так и по эксплуатационным затратам. Определены мобильные, наиболее эффективные и экономически выгодные варианты для устранения конкретного вида источника неприятного запаха. Правильный выбор организационно-технических мероприятий, технологий, проектных и аппаратных (выбор оборудования) решений требует детального обследования объектов выбросов дурно пахнущих веществ и трубопроводной системы в целом, серьезной изыскательской и проектно-технологической проработки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: самотечные трубопроводы, сточные воды, агрессивные газы, запахи, классификация, фиксация, мониторинг, удаление

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Орлов В.А., Саймулло А.В., Мельник О.В. Изучение процесса появления дурно пахнущих запахов в канализационных сетях и анализ средств их удаления // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 3. С. 409–431. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.409-431

A study of the process of malodor formation in sewer networks and analysis of methods for its elimination

Vladimir A. Orlov, Alexey V. Saimullov, Olga V. Melnik

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

ABSTRACT

Introduction. The co-authors analyze the process of malodor formation inside pipelines of non-pressure sewer networks (channels) and their efficient elimination using physicochemical, biological, catalytic, thermal, electric discharge, civil engineering and other methods.

Materials and methods. The co-authors have analyzed literary sources, studied the most advanced malodor registration methods (broken down into malodor identification and intensity control) using specialized malodor detectors; they have also considered potential methods for malodor elimination or intensity reduction, as well as prevention of malodor formation and micro-climate preservation in sewer networks.

Results. The co-authors have identified the reasons for the formation of malodors inside non-pressure pipelines of sewer networks and a number of negative factors that contribute to the formation of gases. The co-authors offer an overview of methods and technologies preventing the formation of anaerobic conditions inside sewer networks. They describe the cases of several cities where malodors were emitted inside sewer networks, as well as the actions aimed at their suppression in particular environments. The co-authors present specific malodor prevention actions using various methods applied in some countries of the world.

Conclusions. The practical implementation of a number of actions aimed at the elimination of malodors in sewer networks is a costly project in terms of capex and operating expenses. Mobile, efficient and economically expedient methods of eliminating specific sources of malodors have been identified. The right choice of actions, technologies, design and device-focused solutions (equipment choice) need a detailed examination in terms of malodor emissions and pipeline systems as a whole, as well as consistent exploratory, research and development efforts.

KEYWORDS: non-pressure pipelines, sewer water, aggressive gases, odors, classification, registration, monitoring, elimination

FOR CITATION: Orlov V.A., Saimullov A.V., Melnik O.V. A study of the process of malodor formation in sewer networks and analysis of methods for its elimination. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(3):409-431. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.409-431 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение атмосферного воздуха в городах в основном обусловлено выбросами промышленных предприятий и транспортных средств [1]. Помимо этого, атмосферный воздух может загрязняться дурно пахнущими веществами, образующимися в самотечных канализационных трубопроводах и выделяющимися через люки смотровых колодцев [2]. Неприятные запахи ухудшают качество жизни человека, поэтому проблема их удаления или предотвращения имеет весомое социальное значение. В настоящее время в РФ нормируются выбросы загрязняющих веществ, но не запахи. Существуют случаи, когда гигиенические нормы для отдельных пахучих веществ не превышаются, однако имеются многочисленные жалобы городского населения на резкий неприятный запах, исходящий от канализационных сетей. В городских условиях и в сельской местности, в быту и на производстве современный человек резко реагирует на ухудшение комфорта среды обитания при наличии запахов.

В европейских и других развитых странах мира большое внимание уделяется негативному воздействию запахов на человека. Наличие в воздухе дурно пахнущих веществ влечет за собой появление заболеваний, потерю трудоспособности, недомогание, дискомфорт и финансовые издержки. Наличие неприятных запахов влияет на стоимость земли и недвижимости, а присутствие агрессивных газов приводит к раннему выходу из строя трубопроводных сетей и оборудования [3–4].

В настоящее время во всем мире запахи рассматриваются как фактор загрязнения окружающей среды, который следует нормировать, стремясь снизить выбросы дурно пахнущих веществ. Государственными органами финансируются программы по контролю и предотвращению негативного влияния запахов на окружающую среду. Отмечается такой факт, что рыночная стоимость недвижимости в развитых странах падает с повышением уровня запахов.

В подобных местах не пользуются популярностью парки, аттракционы или торговые комплексы.

В России получен определенный положительный опыт в решении проблемы запаха в атмосферном воздухе, проделана большая работа по измерению интенсивности запаха, нормированию и контролю запаха, но до сих пор эта проблема не решена на законодательном уровне.

Запах воды обусловлен наличием в ней летучих пахнущих веществ, которые попадают в воду естественным путем либо со сточными водами. Практически все органические вещества (в особенности жидкие) имеют запах и передают его воде. Обычно запах определяют при 20 °С и при повышенной (60 °С) температуре воды [5].

Запах по характеру подразделяют на две группы и описывают субъективно по ощущениям:

- естественного происхождения (от живущих и отмерших в воде организмов, от влияния берегов, дна, окружающих почв и т.д.); некоторые запахи этой группы дают повод считать ее подозрительной в эпидемиологическом отношении;
- искусственного происхождения (от промышленных сточных вод, обработки воды реагентами, из канализационной сети и т.д.).

Запахи искусственного происхождения называют по соответствующим веществам: хлорфенольный, камфорный, бензиновый, хлорный и т.п.

Система водоотведения городов служит благоприятной средой из-за образования в ней таких соединений, как метан, сероводород, диоксид углерода, аммиак, и многих других. Их наличие влечет за собой угрозу для жизни населения, обрушения сооружений в результате взрыва газа в коллекторах, а также вносит значительный вклад в образование парникового эффекта [6]. Основные причины появления неприятных запахов: централизация утилизации сточных вод посредством длинных безнапорных и напорных трубопроводов; завышенные размеры (диаметры) канализационных каналов и трубопроводов; зачастую завышенная оценка

объема сточных вод промышленных предприятий и предприятий сферы услуг; общее снижение потребления воды; снижение объема сточных вод вследствие инфильтрации осадка [7].

Основными факторами, влияющими на возникновение запахов в канализационных сетях, является образование сероводорода H_2S и снижение окислительно-восстановительного потенциала сточных вод [8, 9]. Соединения серы (сероводород, меркаптан, метилсульфид) относятся к веществам с интенсивным запахом, встречающимся в системах отвода и обработки сточных вод. Сероводород присутствует как в атмосфере трубопроводов канализационной сети, так и непосредственно в сточных водах в растворенном виде. Он обладает запахом «тухлых яиц», возникая только в анаэробных условиях вследствие биологических процессов, протекающих, как правило, в налете на стенках канализационных коллекторов [10].

Механизмы патогенного действия сероводорода имеют ряд особенностей. При остром отравлении сероводород попадает в организм при вдыхании. Благодаря хорошей растворимости в крови высокие концентрации токсиканта достигаются быстро. В то же время железосодержащие ферменты дыхательной цепи, цитохромы и цитохромоксидазы блокируются в первую очередь. Существует блокада клеточного дыхания, прежде всего в центральной нервной системе, что приводит к потере сознания. Нарушение сознания является типичным синдромом тяжелого отравления сероводородом.

Серьезная проблема — образование в канализационной системе метана, который может провоцировать в ней взрывы, приводя к выходу из строя трубопроводной сети и значительному экономическому ущербу [11]. Основная доля взрывов связана с возникновением искр во время ремонтных работ в коллекторе.

Определенный негативный эффект представляют и соединения азота, которые встречаются в сточных водах, имея преимущественно форму протеинов (белков) [12]. Первым этапом разложения протеинов может быть дезаминизация (например, гидролитическая). При этом от аминокислот отделяется аммоний. Из соединения аммония при значении $pH > 7$ возникает аммиак (NH_4^{+}), который имеет резкий запах урины. Протеины могут также разлагаться в процессе декарбоксилирования. В качестве его продуктов возникают двуокись углерода (CO_2) и первичные амины (биогенные амины). Больше число этих биогенных аминов обладают интенсивным запахом.

В результате прохождения в сточной воде анаэробных процессов разложения углеводородных соединений появляются неорганические пахучие вещества (низшие жирные кислоты, альдегиды,

спирты и эфиры). Негативную составляющую в образование пахучих веществ вносит температура, повышающая биологическую активность анаэробных микроорганизмов.

Не менее значимая проблема — разрушение и обрушение элементов канализационной сети, которые являются важной составляющей жизнеобеспечения любого города. Исследования и практика эксплуатации канализационных сетей показывают, что они подвержены быстрому и нередко непредсказуемому износу. В крупных городах ежегодно происходят аварии, вызванные обрушением железобетонных канализационных труб [13]. Сероводород, поднимаясь к своду труб, вступает в реакцию с парами воды и образует серную кислоту H_2SO_4 . Кислота с течением времени разъедает бетонные конструкции, превращая их в пастообразную массу. Многочисленные обследования коллекторов сточных вод показывают, что наибольшее выделение сероводорода наблюдается в местах, где сточные воды из напорных трубопроводов изливаются в самотечные участки, а также в перепадных колодцах. При этом разрушение бетонных коллекторов происходит под действием активных микробиологических процессов [14].

Для удаления неприятных запахов необходимо нормировать запахи на основе законодательных актов. При этом для определения нормативов качества атмосферного воздуха, при котором отсутствовали бы причины существенного раздражения у населения, необходим четкий, доступный количественный метод, который позволил бы установить баланс интересов производителей и населения. Разработка методологии и критериев оценки запахов является одной из актуальных задач в области охраны атмосферного воздуха от загрязнений в РФ. Необходимо отметить, что в настоящее время в мире не существует единых стандартов в вопросе нормирования и контроля запахов. Разные страны используют свои подходы к установлению нормативов в области запаха. Однако общим для многих европейских стран является метод измерения запахов, утвержденный в 2003 г. Европейским стандартом EN 13725. Качество воздуха. Определение концентраций запахов с помощью динамической ольфактометрии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

I. Методы и аппаратура для оценки присутствия запахов и контроля их интенсивности

Согласно данным литературных источников, фиксация запахов (пахучих веществ) в воздушной смеси может оцениваться ручным контролем на основе кодовой шкалы интенсивности [15]. Предметом гедонистической окраски, т.е. классификации,

запах может быть «крайне неприятный» — «нейтральный» — «крайне приятный». Под определением вида запаха понимается его характеристика, данная испытуемыми, такая, например, как «противный». Вид запаха невозможно измерить с помощью аппаратуры, он может быть идентифицирован только тестирующими лицами. При установлении вида запаха возможно использование средств, закрепленных в нормативных документах о защите от вредного воздействия.

Существуют два принципиально разных подхода к определению запахов: исследование на источнике и прямые полевые исследования в течение длительного периода времени с установлением максимально допустимой частоты появления запахов [16].

Исследования по определению запаха регламентируются Европейским стандартом EN 13725:2003 и включают выборку проб запаха, их ольфактометрический анализ, расчет выбросов запаха, их рассеивание, определение реального фактического уровня воздействия запаха и оценку его раздражающего потенциала в процентах от людей, испытывающих раздражение в зависимости от рассчитанной по модели концентрации запаха. Для этого требуется специальное устройство, фиксирующее количественные характеристики запаха. Таким прибором является ольфактометр. Данный метод определения запаха применяют в Великобритании, Дании, Бельгии (рис. 1).

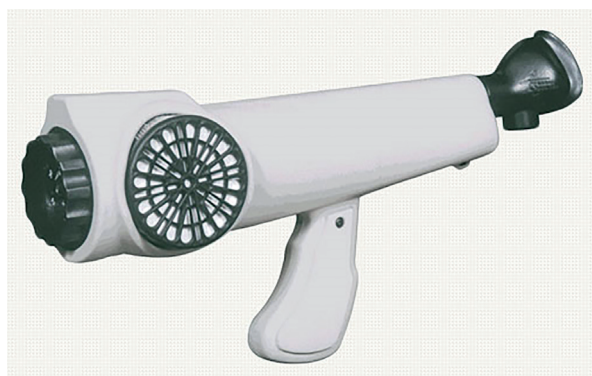


Рис. 1. Полевой ольфактометр Nasal Ranger

Fig. 1. Outdoor olfactometer Nasal Ranger

Существует единичная градация, которая определяет концентрацию (интенсивность) запаха и измеряется в европейских единицах «запах на кубический метр» от 60 и более (сверхсильный) до 2 и менее (очень слабый). Еще одной значимой характеристикой ольфактометра является его чувствительность, т. е. способность фиксировать минимально возможные концентрации неприятных запахов (порог запаха). Это свойство метода наряду с оперативностью фиксации — новое в сфере мониторинга. Полевыми ольфактометрами можно про-

изводить измерения как на открытом пространстве, так и в замкнутом помещении. Полевые исследования позволяют реально оценить степень влияния запаха конкретного объекта, но исключают возможность прогнозирования ситуации в будущем.

Другим методом определения летучих органических соединений (ЛОС), сероводорода, аммиака и т.д. является газовая хроматография [17]. Газовая хроматография идеально подходит для быстрого разделения смешанных летучих компонентов. Эффективность хроматографии улучшается точностью температурного контроля колонны и постоянного потока газа-носителя [18]. В качестве оперативного средства контроля токсичных газов (CO , H_2S , NO_2) могут использоваться переносные фотоионизационные газоанализаторы КОЛИОН-1В со встроенной памятью. В них применяются электрохимические сенсоры, действие которых основано на возникновении тока в электролите в результате окислительно-восстановительных реакций с измеряемым компонентом.

Зарубежные специалисты разработали мобильный сенсор-датчик SewerSnort, устанавливаемый на плавающей платформе в виде спасательного круга. Сенсор, перемещаясь по течению в канализационной трубе, производит замеры концентрации газов в контрольных точках. По мере продвижения датчика он измеряет концентрацию сероводорода в атмосфере трубопровода. Чувствительный элемент находится в центре внутренней трубки для предотвращения погружения его в сточную воду. Корпус устройства достаточно высок, чтобы в случае высокой турбулентности прибор не перевернулся, поскольку габариты датчика невелики и составляют менее 30 см в диаметре и менее 0,5 кг в массе. Измерение концентрации сероводорода основано на электрохимическом методе. На датчике расположены карта памяти, а также контроллер, который позволяет отключать датчик во время его перемещения до точки измерения концентрации газа. Для локализации датчика используются принципы GPS-навигации, т.е. под каждым люком смотрового колодца, представляющим интерес, устанавливаются радиомаяки, которые передают сигналы с информацией о местоположении на датчик-поплавок.

II. Методы предотвращения условий возникновения или снижения концентраций запахов в канализационных сетях

Меры по предотвращению анаэробных условий

Проблемы с запахом, обусловленные наличием сточных вод в трубопроводах, возникают по причине неблагоприятной технологической обработки этих вод, следствием которой является прохождение активных анаэробных процессов [19]. Главным па-

раметром интенсивности запаха служит содержание сульфидов в сточных водах и (или) содержание сероводорода в атмосфере канала или в отработанном воздухе. Результаты их измерения могут, как правило, использоваться для оценки воздействия неприятного запаха, независимо от того, присутствуют ли при этом другие пахучие вещества или нет. Особую опасность в плане возникновения запаха в канализационной сети представляют:

- участки, на которые напрямую отводятся сточные воды, содержащие вещества, обладающие интенсивным запахом, и вещества, поглощающие в больших количествах кислород, а также сульфидсодержащие сточные воды;
- каналы с малым уклоном, с малым частичным наполнением и длительным временем пребывания сточных вод (застойные зоны);
- участки с анаэробными сточными водами, где одновременно возникает сильная турбулентность потока сточных вод;
- участки, где сульфидсодержащие сточные воды текут вместе с кислотными или теплыми сточными водами;
- сборные резервуары (камеры всасывания) на насосных станциях;
- верхние и нижние головные части дюкеров;
- места выходов напорных трубопроводов.

Содействуют появлению неприятных запахов активные коррозионные процессы на внутренней поверхности трубопроводов из бетона, железобетона и стали.

Решение проблемы предотвращения анаэробных условий не может быть найдено в рамках одностороннего подхода. С инженерной точки зрения необходимо комплексное решение проблемы, которое приобретает заметную финансовую составляющую.

Ниже представлены мероприятия по предотвращению анаэробных условий в водоотводящих сетях.

Строительные и эксплуатационные меры

Важнейшим элементом в период проектирования и строительства сетей и сооружений систем водоотведения, а также их последующей эксплуатации является создание условий, предотвращающих потенциальные причины активных анаэробных процессов [20, 21]. Целевой установкой инженерного планирования следует признать предотвращение попадания пахучих веществ в сточные воды и образование там субстанций, ведущих к появлению запаха или к его выходу в атмосферу, либо ограничение подобных явлений до определенной степени [22]. К стандартным, накопленным практикой техническим мерам предотвращения появления неприятного запаха в канализационных сетях относятся:

подача кислорода, устранение турбулентности, прочистка трубопроводов и подача чистой воды, принудительная вентиляция самотечных сетей и их оперативный преимущественно бестраншейный ремонт [23–25].

Цель строительных мероприятий состоит в том, чтобы поддерживать аэробные процессы в воде, например, путем создания турбулентности. Для этого, например, может служить устройство водопадов сточных вод в специальных колодцах [26]. С другой стороны, в случае анаэробных сточных вод следует избегать турбулентности. Донные желоба в колодцах должны прокладываться с учетом расчетных расходов. Следует избегать выступов на пути потока сточных вод, резких изменений направления и большого изменения сечения в донной части. Отложения осадков необходимо минимизировать, например, с помощью соответствующего наклона канала. Воздушный поток не должен сдерживаться никакими препятствиями [27]. При необходимости следует предусмотреть принудительную вентиляцию колодцев с обработкой отработанного воздуха [28].

Проблемы с неприятным запахом зачастую исходят от насосных станций и напорных трубопроводов и концентрируются в точках перехода от напорного к безнапорному режиму течения в каналах [29, 30].

Основные правила планировки и эксплуатации насосных станций и мероприятия по предотвращению распространения неприятных запахов [31]:

- содержание кислорода в поступающей аэробной воде необходимо поддерживать внутри камеры всасывания на максимально высоком уровне;
- сточная вода не должна застаиваться после захода в канал, поскольку это снижает скорость движения воды по направлению течения, ведет к образованию отложений и препятствует вентиляции сточной воды;
- объем камеры всасывания, мощность и порядок работы насосов должны быть согласованы с поступающим количеством сточных вод, местными условиями и размерами напорного трубопровода, для того чтобы обеспечить по возможности короткое время пребывания;
- очень глубокие сооружения затрудняют вентиляцию сточных вод; камера всасывания насоса должна иметь такую форму, чтобы, с одной стороны, имелась поверхность воды большой площади для поступления кислорода, а с другой — были минимальны зоны дна и стенок с постоянным подводным налетом;
- образование отложений из твердых веществ и налета следует снижать путем создания самоочищающихся уклонов и постоянного движения сточных вод; на аэробном участке сточная вода должна

падать в резервуар водопадом, обеспечивая дополнительное поступление кислорода; если втекающая вода содержит сульфиды, то она должна подаваться ниже уровня всасывающих патрубков насосов, чтобы минимизировать турбулентность и тем самым эмиссию сульфидов;

- до полного развития зоны утилизации время включения и выключения насосов следует менять; для определения оптимального цикла работы насосов необходимо исследовать образование в сточной воде сульфида или потребление кислорода;

- газовое пространство сборников должно быть оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией, с тем чтобы обеспечить хороший воздухообмен и надежно производить отвод воздушного потока, поступающего вместе со втекающей сточной водой.

К основным правилам планирования и эксплуатации напорных трубопроводов необходимо отнести [32, 33]:

- при планировании в зонах приема сточных вод необходимо исследовать условия поступления стока в первые годы эксплуатации и в перспективе;

- время пребывания сточных вод в сети следует максимально сокращать посредством плановых и эксплуатационных мер;

- напорные трубопроводы прокладывать преимущественно с подъемом и на максимально коротких участках;

- два напорных трубопровода с малым диаметром могут быть лучше, чем один с большим сечением;

- отложения и налет на стенках образуются при минимальных скоростях течения воды; при необходимости их следует удалять путем регулярных промывок с повышенной скоростью; в этих целях необходимы дополнительные насосные агрегаты; высокая скорость течения воды ведет к взмучиванию и выносу образовавшегося ранее налета; твердые отложения и налет на стенках требуют соответствующей очистки; частоту проведения чисток устанавливают на основе систематических измерений отходящего воздуха; очистку необходимо проводить до того, как будет достигнута критическая концентрация сульфидов;

- при длительных периодах застоя сточной воды напорные трубопроводы следует эксплуатировать вхолостую или их можно подвергать промывке чистой водой.

Одним из наиболее эффективных строительных методов предотвращения проблем с неприятным запахом является эффективная вентиляция [34–37].

Если проблемы с неприятным запахом не удаётся надёжно предотвратить или в достаточной мере снизить путем строительных и эксплуатационных

мер, то можно воспользоваться методами борьбы посредством обработки отходящего воздуха. При выборе метода необходимо учитывать следующие моменты [38]:

- предпосылкой является фиксация реального состояния, определение концентрации пахучих веществ и фактических объемов потоков;

- необходимо, чтобы метод мог быть реализован в конкретных условиях эксплуатации; его использование должно быть совместимым с действующим законодательством (например, постановление о сбросе сточных вод);

- следует исключить вредное влияние строительных и конструктивных материалов на очистку сточных вод;

- возможен годовой испытательный срок с одновременной оптимизацией для получения статистически надежных данных;

- подтверждением действенности метода является измерение H_2S в режиме онлайн; возможно сопровождаемое измерение ольфактометром.

Как отмечалось выше, к строительным и эксплуатационным мерам следует отнести оперативный ремонт тех участков трубопроводной сети, которые наряду с проблемами распространением дурно пахнущих запахов имеют различного рода дефекты и более не подлежат эффективной эксплуатации [39, 40]. При этом предварительным этапом должна служить их детальная диагностика [41, 42].

Дезинфекция сточных вод

В качестве методов эффективного обеззараживания биологически очищенных сточных вод могут использоваться: хлорирование, озонирование, ультрафиолетовое и ультразвуковое облучение т.д. [43]. Хлор давно используется в качестве основного дезинфицирующего средства практически на всех очистных сооружениях российских городов благодаря дешевизне и простоте исполнения хлораторов [44]. Поскольку хлор довольно токсичен и опасен, очистные сооружения во многих городах России активно рассматривают другие реагенты для обеззараживания сточных вод, например, гипохлорит натрия [45]. Использование озонирования наиболее эффективно, но весьма затратно в денежном отношении [46].

Отдельного рассмотрения заслуживает метод обеззараживания сточных вод ультрафиолетовым облучением [47]. Этот метод очистки является физическим процессом, поэтому он исключает образование химических соединений, которые могут нанести вред человеку. К положительным аспектам метода очистки можно отнести следующие: уникальные дезинфицирующие свойства, минимальное время, необходимое для завершения процесса очистки, низкая стоимость процесса и небольшие

размеры установок. Поскольку дезинфекция происходит на клеточном уровне, это не оказывает вредного воздействия на воду. Среди вышеперечисленных методов дезинфекции сточных вод и коммуникаций использование ультрафиолетового облучения является наиболее передовым, а в случае совместного использования с ультразвуком позволяет значительно ускорить процессы обеззараживания [48, 49].

Термическое окисление

Путем термического окисления или прямого сжигания можно достичь эффекта удаления горючих компонентов из газовых потоков преимущественно органического происхождения, например, когда присутствует большое количество метана [50]. Однако этот метод в рамках решаемых проблем в канализационной сети оценивается как достаточно дорогостоящий, поэтому его используют только при незначительных выделениях газов и агрессивных веществ в окружающем воздухе. Следует отметить, что удаление сероводорода путем термического окисления кислородом воздуха требует высоких температур (порядка 1200 °C), что для решения настоящих задач также потребует значительных затрат [51].

Биологические методы

Биологические методы основаны на сорбции токсичных и неприятно пахнущих веществ из газового потока через водную фазу, т.е. среду обитания микроорганизмов, с последующим уничтожением сорбированных веществ этими микроорганизмами [52, 53]. Биологические методы используются как в жидкой фазе, так и в газовой. Они являются наиболее экономичными с точки зрения эксплуатационных расходов, но требуют значительных капиталовложений. Установки биологической очистки воды и газа обычно подразделяются на биофильтры, биоскрubberы и биофильтры с оросительными слоями. Системы биологической дезодорации без ограничения производительности разработаны и доступны как за рубежом, так и в России [54]. Они обычно заполнены органическими наполнителями, такими как опилки и различного типа крошки, на поверхности которых развиваются микроорганизмы. Биофильтры требуют достаточно больших площадей и длительного времени для адаптации к новым веществам или для изменения концентрации загрязняющих веществ, подлежащих удалению. Краткосрочные выбросы (пиковые выбросы) с концентрацией, значительно превышающей рабочие выбросы, могут легко проходить через все слои фильтра. Установки биологической очистки имеют ограничение на допустимую нагрузку подлежащих удалению веществ и могут быть дезактивированы, если они превышены. Если, например, сероводород удаляется со

значительным пиком превышения его концентрации в биофильтре, образуется серная кислота, что может привести к разрушению биофильтра и гибели микроорганизмов. В результате его необходимо заменить в аварийном режиме и утилизировать омертвевшую загрузку.

В биоскрubberах обычно используются неорганические поверхности с микроорганизмами на них и принудительная циркуляция воздуха. Как правило, биоскрubberы имеют закрытую корпусную вертикальную конструкцию, поэтому их площадь значительно меньше, чем у биофильтров, и меньше подвержена влиянию соответствующих погодных условий. По сравнению с биофильтрами они более дорогостоящие как по эксплуатационным, так и по капитальным вложениям, поэтому используются избирательно. Биоскрubber, который позволяет при расходе воздуха 35–55 л/с удалять около 95 % H_2S при исходной его концентрации 5–7 мг/м³, представлен на рис. 2.



Рис. 2. Биоскрubber

Fig. 2. Bioscrubber

В целях создания аэробных условий, препятствующих процессам гниения органических загрязнений в сети и обеспечения предварительной очистки сточных вод на этапе транспортировки, в Республике Армения (г. Цахкадзор) предложено проводить аэрацию сточных вод на высокоскоростных участках сети с помощью самовращающегося аэратора, установленного в колодцах. Вращение элементов аэраторов обеспечивается кинетической энергией сточной жидкости. Устройство представляет собой горизонтальный металлический вал, на котором неподвижно в вертикальном положении закреплены круглые диски через 15–20 мм. Диски

изготовлены из легких полимерных материалов толщиной 10–15 мм и при эксплуатации не корродируют и не отклоняются от вертикальной плоскости. На концах вала устанавливаются подшипники, которые крепятся к опорам. Вращающееся устройство монтируется в лотке колодца, а опоры вала крепятся к берме (рис. 3).

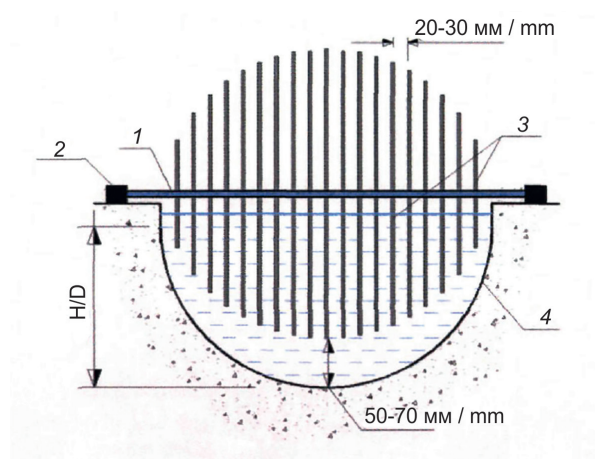


Рис. 3. Самовращающийся аэратор: 1 — вал; 2 — подшипники на опорах; 3 — круглые диски; 4 — лоток трубы
Fig. 3. Autorotating aerator: 1 — roll; 2 — bearings resting on supports; 3 — circular disks; 4 — pipe tray

Нижняя точка центрального с наибольшим диаметром диска должна находиться на 50–70 мм выше отметки дна лотка, а боковые диски — на 30–50 мм. Оставшийся зазор между дисками аэратора и дном лотка обеспечивает беспрепятственное прохождение загрязнений, перемещающихся по дну лотка (тряпки, бумага, полиэтиленовые мешки и др.). Для определения диаметров дисков требуется уточнить максимальное и минимальное наполнение коллектора, чтобы установленный аэратор круглосуточно находился в сточной воде и непрерывно вращался. Вращение аэратора происходит вследствие взаимодействия моментов сил скоростного напора потока и возникающих сил трения на соприкасающихся с жидкостью поверхностях дисков при движении сточных вод (рис. 4).

Разработанная конструкция аэратора с биопленкой работает как дисковый вращающийся биореактор. В зоне поворота дисков Б–А (в верхней части реактора) биопленка выходит непосредственно на поверхность и обогащается кислородом воздуха, а при погружении в сточную воду (в зоне А–Б) происходит сорбция и окисление загрязняющих веществ биомассой. В этом случае концентрация растворенного кислорода постепенно уменьшается до повторного выхода рассматриваемой части диска на поверхность, далее начинается новый цикл. Учитывая, что температура в канализационном колодце

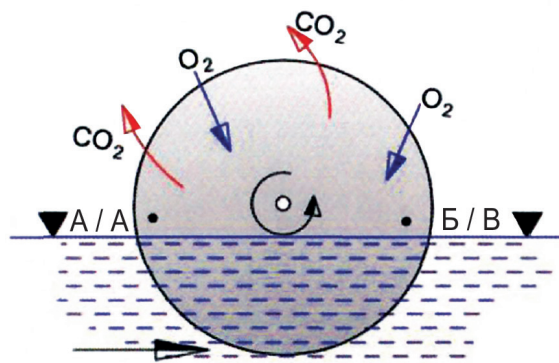


Рис. 4. Схема вращения аэратора
Fig. 4. Aerator rotation scheme

даже в холодный период года не падает ниже 10 °С, работа самовращающегося аэратора в качестве биофильтра является стабильной.

На рис. 5 показана конструкция канализационного колодца с самовращающимся аэратором.

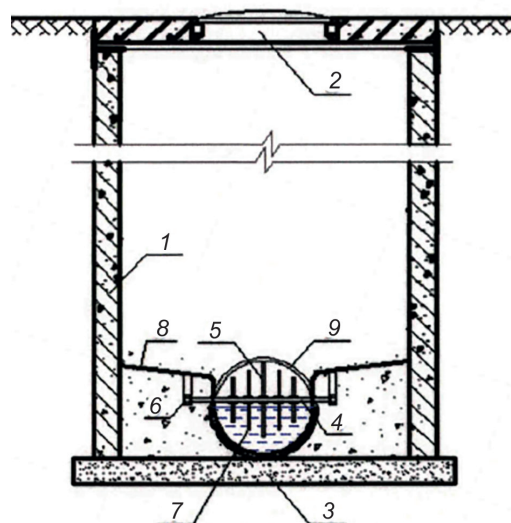


Рис. 5. Канализационный колодец с аэратором: 1 — стенка смотрового колодца; 2 — люк; 3 — плита дна колодца; 4 — ось самовращающегося устройства; 5 — наибольший диск; 6 — подшипники; 7 — диск малого диаметра; 8 — опоры вала; 9 — сводная часть самотечного трубопровода

Fig. 5. Sewer manhole with an aerator: 1 — access manhole wall; 2 — hatch; 3 — manhole bottom slab; 4 — axis of the self-turning mechanism; 5 — maximal diameter disk; 6 — bearings; 7 — small diameter disk; 8 — roll supports; 9 — top part of a non-pressure pipeline

Сорбционные методы

Методы сорбции основаны на поглощении примесей из воздуха твердыми или жидкими сорбентами [55]. Жидкие сорбенты на городских очистных сооружениях широко не используются. Отчасти это связано с тем, что при регенерации рабочей жидко-

сти поглощенные примеси должны удаляться, что является отдельной технологической задачей.

В качестве твердых сорбентов для очистки газов чаще всего используются активированные угли [56]. Для повышения эффективности очистки воздуха от сероводорода также применяется углерод, пропитанный различными катализаторами. Системы очистки воздуха на основе активированного угля надежно и тщательно освобождают воздух от различных (практически всех) загрязнений, что является их основным преимуществом. На рис. 6 представлена колонна с засыпкой из угля для расхода воздуха 1300 м³/ч и массовой концентрации H₂S до 2,4 мг/кг.



Рис. 6. Угольный фильтр с вентилятором и насадкой для ослабления акустических шумов

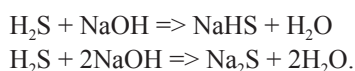
Fig. 6. Charcoal filter with a fan and a nozzle suppressing acoustic noise

Основным и, пожалуй, единственным недостатком активированного угля в отношении средних и высоких расходов воздуха, а также больших концентраций дурно пахнущих веществ является его ограниченный срок службы либо большой объем, что приводит к значительным эксплуатационным затратам. Кроме того, отдельная проблема — утилизация и регенерация активированного угля.

Химические методы

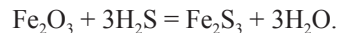
Химические методы, как правило, воздействуют избирательно на примеси, являются достаточно дорогими для локализации и в основном применяются для очистки промышленных газов [57]. В зависимости от агрегатного состояния поглотителя химические методы подразделяются на сухие и мокрые.

Наиболее простой мокрый химический способ удаления сероводорода реакция со щелочью в растворе:



Недостатком использования гидроксида натрия служит реакция с углекислым газом CO₂, который всегда содержится в воздухе, что приводит к существенному увеличению расхода щелочи.

В качестве сухих поглотителей в промышленности широкое распространение получили гидрат окиси железа и оксиды железа, а в отдельных случаях марганцевые руды. Некоторые из них могут применяться для удаления запахов из воздуха в промышленных системах. Для тонкой очистки от сероводорода используют оксиды железа:



Так, 1 кг Fe₂O₃ способен удалить до 0,64 кг H₂S. Этот поглотитель производится промышленно и предлагается в виде готовых гранул, которые можно загружать в реактор для очистки прямо в мешках. Оксид цинка ZnO снижает концентрацию сероводорода и меркаптанов до очень малых значений. Метод эффективный, но дорогостоящий — примерно в 50 раз дороже, чем применение оксида железа [58].

Недостатки химических способов заключаются в избирательности действия; необходимости утилизации полученных продуктов; потребности в реагентах; необходимости удаления их остаточных количеств из обработанного воздуха и наличия складских помещений для хранения реагентов и продуктов.

Озонирование — также разновидность химического метода [59]. Поскольку озон — более сильный окислитель, чем кислород, он гораздо быстрее окисляет пахучие примеси путем «холодного сжигания». Преимущество метода состоит в воздействии озона практически на все виды пахучих веществ (органику, аммиак, сероводород и т.д.). Окисление сероводорода может происходить как с образованием серы, так и ее оксидов. Процесс сильно зависит от исходной концентрации H₂S, температуры, влажности и расхода воздуха. Для получения удовлетворительных результатов оптимальное соотношение числа молекул озона O₃ к H₂S должно составлять 1,5–2, а время контакта молекул газа с озоном — не менее 10–15 с. Отметим, что для сравнительно малых концентраций сероводорода время реакции может быть более продолжительным, так как оно определяется кинетикой бимолекулярной реакции.

Генерация озона может производиться как непосредственно в потоке очищаемого воздуха в специальной реакционной камере, так и в озонаторах в чистом сухом воздухе (возможно, обогащенном кислородом или в чистом кислороде) с последующим введением озона в поток очищаемого воздуха. Считается, что наиболее эффективны электроразрядные методы генерации озона, в частности, в промышленных генераторах озона используется барьерный разряд. В первом случае эффективность генерации сильно зависит от степени загрязнения очищаемого воздуха, в частности, от его влажности (эффективность генерации озона при 100 % влажности любым электроразрядным методом крайне

мала). Нельзя не отметить, что при введении озона или озono-воздушной смеси в поток очищаемого воздуха возникают проблемы с тщательным перемешиванием двух потоков.

Инновационной технологией устранения запахов в помещениях любого типа является использование «сухого тумана»¹. Суть технологии заключается в использовании помещенной в закрытой емкости (бак с соплом) специальной жидкости, где она после нагрева, превращаясь в туман, выбрасывается в замкнутый объем. Состав в газообразном состоянии разделяется на максимально мелкие частички, которые способны проникнуть даже в самые труднодоступные места. Они плотным слоем покрывают все поверхности, нейтрализуя неприятные запахи (физико-органического происхождения, запахи мочи, кала, затхлость и т.д.). К сожалению, частицы «сухого тумана» со временем будут разрушаться, и застарелые неприятные запахи могут снова вернуться. В таком случае через определенное время может потребоваться повторная обработка.

Каталитические методы

Каталитические методы в борьбе с дурно пахнущими газовыми выбросами базируются на окислении вредных примесей на поверхности катализатора [60, 61].

Суть процесса очистки газовых выбросов заключается в том, что на катализаторе происходит окислительное или восстановительное разложение токсичных примесей до безвредных состояний: воды, азота и диоксида углерода. Органические примеси газовых выбросов и оксид углерода, как правило, в результате каталитического окисления разлагаются до воды и диоксида углерода. Оксиды азота, наоборот, восстанавливаются до азота.

Каталитическое окисление H_2S можно осуществлять во взвешенном слое из высокопрочного активного угля по реакции:



Активаторами этой каталитической реакции служат водяной пар и аммиак, добавляемый к очищаемому газу в количестве порядка $0,2 \text{ г/м}^3$. Активность катализатора снижается по мере заполнения его пор серой и когда масса серы достигает 70–80 % от массы угля, катализатор регенерируют промывкой раствором $(NH_4)_2S$. Промывной раствор полисульфида аммония разлагают острым паром с получением жидкой серы.

Катализаторы окисления кислородом воздуха практически не используются для удаления запахов в выбрасываемом воздухе в системах транспортировки и очистки сточных вод, так как работают при

повышенных температурах (порядка 300°C) и достаточно дорого стоят. Известны катализаторы, применяемые для окисления при работе с другими окислителями, в частности, с озono-воздушной смесью, но даже для них максимальная эффективность достигается при температуре, близкой к 90°C . Существенный недостаток данного метода — необходимость предварительной тщательной очистки выбрасываемого воздуха от механических загрязнений и аэрозольных частиц. Наличие в них неорганических компонентов приводит к быстрому загрязнению поверхности катализатора или даже его «отравлению», что на порядок снижает активность катализаторов. Достаточно высокая стоимость катализаторов обуславливает необходимость их регенерации, что в любом случае является непростой технологической задачей.

Фотокаталитический метод

В последнее время разрабатывают фотокаталитические методы очистки воздуха от примесей. В отличие от каталитических методов активные центры на поверхности фотокатализатора создаются под действием поглощенного света. В качестве фотокатализаторов используют полупроводниковые оксиды или сульфиды (TiO_2 , ZnO , CdS и др.), в которых при поглощении света возникают пары «электрон — дырка», способные генерировать свободные радикалы благодаря высокому окислительному потенциалу. Пары «электрон — дырка» могут либо напрямую окислять адсорбированные молекулы, либо взаимодействовать с адсорбированными гидроксильными группами с образованием сильного окислителя — гидроксильных радикалов (ОН), которые, в свою очередь, окисляют адсорбированные молекулы органических веществ. Таким образом, образующиеся ОН радикалы являются главными окисляющими агентами.

При контакте дурно пахнущих газов с активными центрами происходят реакции их окисления, вплоть до CO_2 и воды. Подробно механизм фотокаталитической очистки воздуха описан в работе [62].

Эффективность фотокаталитических процессов зависит от степени адсорбции удаляемого вещества, наличия влаги в воздушной среде, состава исходных веществ и образующихся продуктов, наличия загрязнений. Для разрушения примесей необходимо, чтобы каждая молекула примеси из объема столкнулась с поверхностью фотокатализатора. При очистке воздуха фотокатализаторы наносят на твердые поверхности, нити и ткани, которые располагаются около источников УФ-излучения.

В настоящее время ряд известных производителей (например, Daikin, Япония) разрабатывают и выпускают оборудование небольшой производительности для очистки воздуха с использованием

¹ Сухой туман как способ удаления неприятных запахов. URL: <https://drivertip.ru/zhizn/suhoy-tuman-dlya-udaleniya-zapahov.html>

фотокаталитических узлов. Оборудование предназначено для удаления запаха в небольших помещениях, автомобилях, туалетах. При этом достаточно эффективно удаляются основные загрязняющие компоненты, обладающие неприятным запахом, такие как аммиак, триметиламин, сероводород, ацетальдегид, метилмеркаптан и др. Как и для каталитических методов, обязательным является качественное предварительное фильтрование воздуха.

Электроразрядные методы

Электроразрядные методы применяются для очистки воздуха и газов от пыли в целях разрушения токсических веществ и удаления запахов. Кроме использования электрических разрядов, делались попытки применения (в том числе и для очистки воздуха) электронных пучков высоких энергий. Электрический разряд может разрушать химические вещества. Очистка воздуха от нежелательных примесей основана на плазмохимических реакциях с участием электронов, ионов, возбужденных атомов и молекул, радикалов OH , N , H , O и химически активных молекул (например, озона), которые образуются в электрическом разряде [63].

Электрические разряды в воздухе при атмосферном давлении могут быть реализованы в виде коронного, стримерного, импульсного стримерного, ба-

рьерного разрядов и их сочетаний. Коронный разряд образуется вблизи металлического острия или тонких проволочек, на которые подано высокое напряжение (5–20 кВ). Область, занимаемая коронным разрядом, составляет доли сантиметра, а ток не превышает нескольких миллиампер. При увеличении тока разряд из коронного превращается в стримерный, который представляет собой пучки тонких тускло светящихся каналов. Для ограничения тока разряда и улучшения однородности прорастания стримеров в разрядный промежуток вводят диэлектрический барьер. Такой разряд называют барьерным.

На рис. 7 приведены примеры устройств для удаления запахов с помощью электрических разрядов различных типов.

Фотохимические методы

При воздействии ультрафиолетового излучения с длиной волны менее 200 нм в воздухе эффективно идут процессы диссоциации кислорода и воды с образованием прежде всего атомарного кислорода и радикалов OH [64]. Эти частицы чрезвычайно реакционно-способны и вызывают цепочки химических превращений, в том числе с дурно пахнущими выбросами, находящимися в воздухе. Например, атомарный кислород трансформируется в озон, который также является мощным окислителем.

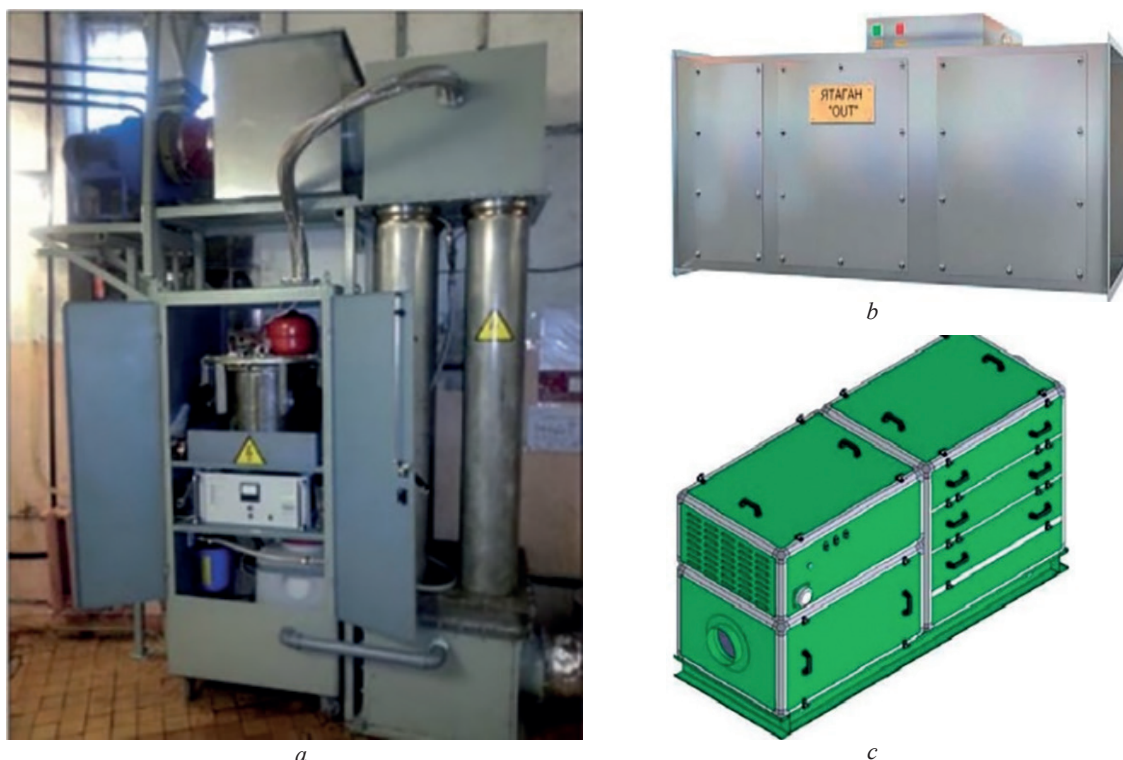


Рис. 7. Установки для удаления запахов электроразрядными методами: *a* — «Корона» — импульсный коронный разряд; *b* — «Ятаган» — высоковольтный барьерно-стримерный разряд; *c* — «Плазмокат» (разрядный + каталитические блоки)
Fig. 7. Electric discharge odor eliminators: *a* — “Crown” — impulse crown discharge; *b* — “Yatagan” — high-voltage barrier discharge streamer; *c* — “Plazmocat” (discharge + catalytic bricks)

УФ-излучение с длиной волны 200–300 нм поглощается озоном с образованием ОН-радикала (при наличии молекул воды) и атомарного кислорода. Совокупность этих процессов позволяет сохранять в облучаемом реакционном объеме достаточно высокую концентрацию активных частиц в течение длительного времени, что повышает эффективность окисления дурно пахнущих веществ.

Основными преимуществами этого способа по сравнению с электроразрядными методами являются относительно высокая однородность генерации радикалов во всем реакционном объеме и относительная независимость от влажности воздуха (чем выше влажность, тем больше радикалов ОН). Современные мощные УФ-лампы позволяют создавать устройства большой производительности для удаления дурно пахнущих газов различной природы. В этих устройствах применяют лампы различных типов и их комбинации (рис. 8).



Рис. 8. Установка для удаления запахов вентиляционных выбросов очистных сооружений канализации фирмы AerOzon Technologie (ФРГ)

Fig. 8. Ventilation emission odor eliminator for sewage treatment facilities made by AerOzon Technologie (Germany)

Основной недостаток этого способа — необходимость большого запаса по мощности для предотвращения проскоков при пиковых нагрузках, возникающих при эксплуатации.

Комбинированные методы

Практическое использование перечисленных методов показало, что ни один из них в отдельности не обеспечивает выполнение требований, предъявляемых к удалению дурно пахнущих запахов в системах транспортировки и очистки сточных вод:

- при работе с грязным воздухом (взвешенные вещества до 10 мг/м³, наличие аэрозольных частиц, высокая влажность — до 100 %, широкий спектр неорганических и органических загрязнений);
- при удалении запахов до предела чувствительности, а не просто снижение их концентрации на 90 % и более, а для загрязняющих веществ с по-

рогом обнаружения большим, чем ПДК в воздухе населенных мест;

- при пиковых нагрузках по сероводороду H₂S и летучим органическим соединениям как минимум на порядок выше средних концентраций с сохранением при этом своих выходных параметров;
- при работе в автономном режиме в любых климатических условиях.

В качестве одного из наиболее перспективных и динамично развивающихся методов очистки от дурно пахнущих выбросов является комбинированный фотосорбционно-каталитический метод. Суть его состоит в том, что очищаемый воздух обрабатывается ультрафиолетовым излучением с длиной волны 185–254 нм, что приводит к образованию активных окислительных центров, прежде всего атомарного кислорода О, радикала ОН, озона О₃ и др. Процессы трансформации дурно пахнущих запахов идут вначале в объемной части фотореактора, затем воздух подается на сорбционно-каталитическую ступень, где недоокисленные компоненты адсорбируются и доокисляются в более медленных процессах активными частицами из газовой фазы, в том числе и кислородом воздуха. Такая комбинация методов и процессов позволяет обеспечить высокую степень очистки воздуха при наличии в нем широкого спектра таких соединений, как сероводород, меркаптаны, аммиак, летучие органические соединения и др. В зависимости от состава и концентрации газов в очищаемом воздухе используются одно- или двухстадийные схемы очистки (рис. 9).

НПО «ЛИТ» использует фотосорбционно-каталитический метод в серии промышленных комплексов очистки воздуха (ВЕНТЛИТ) от дурно пахнущих выбросов для средних и больших производительностей. Этот метод также применен к задачам очистки вентиляционных выбросов в системах транспортировки и очистки сточных вод. Первые результаты по промышленной апробации этих комплексов были получены на объектах ГУП «Водоканал Санкт-Петербург» и АО «Мосводоканал».

На Василеостровской насосной станции перекачки сточных вод Санкт-Петербурга был применен комплекс ВЕНТЛИТ МСД-5000. Одностадийная схема обеспечила надежное удаление газов из вентиляционных выбросов станции при производительности до 6500 м³/ч, средних концентрациях сероводорода до 7 мг/м³ и пиковых до 20 мг/м³, средних концентрациях летучих органических соединений 12 мг/м³ и пиковых до 40 мг/м³. На выходе из комплекса концентрация H₂S составляла менее 0,05 мг/м³, концентрация летучих органических соединений не превышала 3–4 мг/м³ (фоновая концентрация 2 мг/м³). Органолептически на выходе запахов отсутствовал.

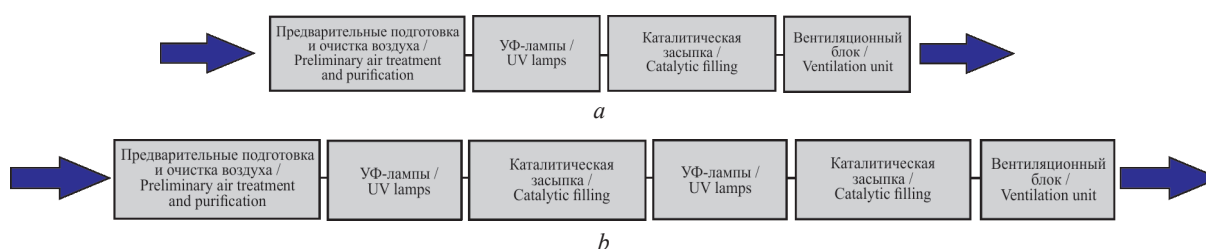


Рис. 9. Схема одностадийного (а) и двухстадийного (б) фотосорбционно-каталитического метода

Fig 9. Flow chart for a one-step (a) and two-step (b) photosorption-catalyst method

В Москве на Люберецкой станции аэрации летом 2015 г. в отделении решеток на насосной станции цеха механического обезвоживания осадка запущен в промышленную эксплуатацию комплекс ВЕНТЛИТ МСД-10000 с двухстадийной схемой (рис. 10).



Рис. 10. Установка ВЕНТЛИТ производительностью 10 тыс. м³/ч для удаления дурно пахнущих вентиляционных выбросов

Fig. 10. VENTLIT unit, capacity 10 thousand m³/hour, designated for elimination of malodorous vent emissions

Содержание сероводорода на входе в установку составляло 10–60 мг/м³, общей органики 5–50 мг/м³. На выходе из установки концентрация сероводорода была менее 0,05 мг/м³, общей органики — менее 1 мг/м³. На входе в комплекс средние концентрации H₂S составляли до 30 мг/м³ (пиковые до 60 мг/м³), средние концентрации летучих органических соединений — до 35 мг/м³ (пиковые до 55 мг/м³). На выходе из сооружения концентрация H₂S не превышала 0,05 мг/м³, летучие органические соединения отсутствовали (при точности измерения 0,5 мг/м³). Запах на выходе отсутствовал. Для очистки вентиляционных выбросов старого здания решеток цеха механической очистки воды в декабре 2015 г. установлен и в январе 2016 г. запущен в эксплуатацию комплекс общей производительностью 40 тыс. м³ /ч (четыре установки ВЕНТЛИТ МСД-10000 (рис. 11).



Рис. 11. Здание решеток цеха механической очистки воды с четырьмя установками ВЕНТЛИТ МСД-10000

Fig 11. Bar screen building of mechanic water treatment works having four VENTLIT MSD-10000 units

При тех же характеристиках выбросов (на входе концентрация H₂S до 60 мг/м³, летучих органических соединений — до 55 мг/м³) комплекс надежно удалял дурно пахнущие газы: на выходе H₂S и летучие органические соединения отсутствовали (при точности измерения приборов контроля, соответственно, 0,05 и 0,5 мг/м³). Органолептически запах отсутствовал.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве результатов проведенной работы по исследованиям методов эффективного устранения дурно пахнущих запахов из канализационных систем ниже рассмотрены комплексные мероприятия по совершенствованию эксплуатации действующих сооружений, а также их строительства (реконструкции) вкуче с применением механических и химических методов устранения вредных газов.

I. В отношении эксплуатационных мер наиболее действенным решением предотвращения запахов является дополнительная чистка (промывка) каналов там, где вследствие малого расхода на них образуется налет, который создает опасность возникновения запаха. К таким местам в канализационной сети можно отнести ее периферийные

участки, так как вблизи канализационных насосных станций дополнительная чистка не является средством борьбы с неприятным запахом. Там сточные воды поступают в большом количестве и протекают с высокой скоростью.

Другим эксплуатационным методом борьбы с запахами является оптимизация работы насосов насосной станции. Как известно, многие насосные станции работают по принципу экономии энергии; т. е. поступающие сточные воды в промежутки повышенной стоимости энергии остаются в канализационной сети и откачиваются в тот период времени, когда стоимость электроэнергии ниже и (или) объем откачиваемой сточной воды оптимизируется под очистные сооружения для обеспечения равномерного притока к ним. Для того чтобы снять остроту проблемы с запахом, эксплуатационным организациям следует изменить режим работы насосной станции по согласованию с очистными сооружениями и, возможно, другими насосными станциями с учетом предотвращения появления неприятного запаха. Однако окончательное решение проблемы не может быть достигнуто откачиванием сточных вод по принципу *just in time* (точно в нужное время), если причина неприятного запаха лежит в образовании серной кислоты.

II. Перечень строительных мер по предупреждению или снижению интенсивности запахов включает следующие аспекты: *реконструкция перепадных колодцев*, *монтаж автоматических промывных устройств*, *уменьшение условного прохода (диаметра) канализационных сетей*, *установка биологических фильтров* в колодцах и над колодцами.

Под реконструкцией перепадных колодцев прежде всего рассматривается их герметизация, предотвращающая выход усиленного образования запахов вследствие имеющихся водопадов (турбулентности) загнивающей воды. Существующие перепадные колодцы также могут демонтироваться таким образом, чтобы загнивающие сточные воды могли течь ровным потоком без турбулентности. В этой связи колодцы покрываются коррозионно-устойчивым цементным раствором. Такое мероприятие характерно для участков с анаэробным состоянием (практическое отсутствие растворенного кислорода в сточной воде). Естественно, что эффективность реализации этих мер сильно зависит от гидравлических параметров сети (расхода сточных вод) и местных условий (глубина залегания перепадных колодцев).

Сущность монтажа автоматических промывных устройств заключается в частичном накоплении некоторого объема сточных вод, который по достижению заданного объема или уровня сбрасывается в канал. Посредством перепадов и возникающей турбулентности сточная вода вентилируется.

При малых расходах сточных вод этот метод имеет недостаток: время пребывания сточной воды в канале увеличивается. В таких случаях для промывки можно использовать сырую или питьевую воду. В зависимости от зоны действия таких промывных установок их следует устанавливать через определенные интервалы по длине канала. Интервалы и зоны действия установки определяются с помощью натурных измерений.

Что касается уменьшения условного прохода из-за снижения потребления воды или в слишком малом расходе сточных вод, то наиболее действенными решениями являются реконструкции сетей путем нанесения различного типа защитных покрытий. К ним можно отнести, например, полимерные рукава и спиральные оболочки [65–67], напыляемые органические и неорганические облицовки [68–70], протаскивание полимерных труб в виде отдельных модулей или плетью [71–73]. Возможно применение и других бестраншейных методов, широко используемых при реконструкции водопроводных и канализационных сетей, в частности, точечный ремонт [74–77] в местах наибольших отложений загрязнений на канализационных сетях, которые провоцируют анаэробные процессы [78–80].

Установка блокирующих запах биологических фильтров в колодцах производится как под крышкой люка, так и над ним. Опыт эксплуатации сетей с фильтрами под крышкой люка перепадных колодцев показывает, что ими поглощается слишком много жидкости, поступающей с поверхностным стоком, что снижает воздухообмен в колодце. Накапливающаяся влага, в частности, может вести к усиленной коррозии в колодце, а также к тому, что запах может выходить из уличных водосточных труб, поднимаясь на балконы квартир, вызывать жалобы жильцов. Опыт эксплуатации таких фильтров показывает, что после относительно короткого промежутка времени их эффективность снижается. На практике после некоторого времени работы фильтры заменялись обычной пленкой для герметизации колодца. Необходимо отметить, что очистка отходящего воздуха является ограниченной местной мерой и не устраняет причин. Неприятные запахи могут значительно усилиться в других местах.

Очистка отходящего воздуха эффективна лишь тогда, когда воздух из канала отсасывается и затем пропускается через фильтры.

При использовании фильтров над люком колодцев они монтируются в форме пакета, устанавливаемого в некоторый контейнер. В этом же контейнере находится и насос. Воздух посредством откачки выходит из колодца через отверстие в герметичном перекрытии и по патрубку подается в контейнер. Роль фильтрующих элементов сводится к очистке

дурно пахнущего воздуха, перед тем как он выводится наружу. Основой для расчетов производительности насоса и фильтров служит воздушный поток, расход которого, как правило, нельзя рассчитать с высокой точностью. Оценить интенсивность потока можно лишь путем измерений в различные моменты сброса сточных вод. В качестве недостатков таких систем можно отметить, что расчетное (запланированное) электропитание насосов не может быть обеспечено на длительный период времени. Ввиду этого практикой отмечались случаи, когда воздух поступал к фильтрам естественным путем. При этом эффективность очистки газов не снижалась. После изъятия таких фильтров наблюдался низкий процент их износа, что свидетельствовало о малых объемах проходящего через них воздуха. Таким образом, высказывается предположение, что эффективность фильтров существенно возрастет при откачке воздуха насосом. Недостатки оборудования колодцев фильтрами: обязательное административное согласование с дорожными службами установки фильтров на тротуарах; прокладка труб к фильтрам для отвода воздуха; защита насоса при установке в шахте.

III. В качестве *механических методов* можно рассматривать вентиляцию подсводного пространства канализационной сети. При выборе механических методов на передний план ставится принцип предотвращения образования запаха. Сюда относятся методы, посредством которых свободное пространство вентилируется и тем самым предотвращается образование H_2S . К таким методам относится экономичная технология DRAUSY, включающая систему шлангов для выравнивания давления. По этой технологии в коллектор подается воздух специальным компрессором. При использовании метода необходимо рассчитать выталкивающую силу в зависимости от воздушного потока в системе шлангов и в соответствии с этим их утяжелять, например, стальными тросами.

IV. К *химическим средствам* прежде всего следует отнести применение препарата Нутриокс (Nutriox). Данное химическое средство применяют там, где другие меры не дают желаемого успеха для предотвращения образования запаха.

Нутриокс обладает следующими положительными характеристиками:

- защищает производственную среду, поскольку токсичный сероводород и легко испаряющиеся органические вещества не генерируются и, следовательно, не распространяются;
- выводит сульфид в водной фазе, когда тот уже присутствует вследствие биологического окисления;
- предотвращает образование запахов и токсичных соединений, которые создаются в процессе биологической ферментации в анаэробных условиях;

- предотвращает (или значительно сокращает) коррозию (скорость, степень) бетона и металлических составляющих поскольку H_2S больше не выделяется;

- изменяет качество воды; повышает pH и щелочность.

Для оптимизации дозировки препарата Нутриокс необходимо выполнить большой объем измерений. Кроме того, для определения места применения средства требуется тщательно проверить возможности установки емкости заданного объема, монтажа дистанционного управления и прочие меры охраны труда. Важную роль для дозировки средства играет удаленность места его применения от насосной станции или очистного сооружения.

Результаты рассмотренных выше методов устранения дурно пахнущих запахов из канализационных систем позволили сделать следующие предварительные выводы:

- плановая промывка как средство борьбы с запахами является наиболее эффективным мероприятием для систем водоотведения таких городов, как Берлин, Санкт-Петербург, Ереван и т.д.;

- применение фильтров в колодцах можно оценить как непрактичное, поскольку фильтры не обеспечивают достаточного воздухообмена в колодцах (кроме того, дополнительную нагрузку на фильтры создает приток поверхностных вод);

- монтаж фильтровальных установок для откачки воздуха над колодцем эффективен и может принести положительные результаты, однако применение таких установок в больших городах с интенсивным уличным движением возможно лишь в определенных местах и связано с большими административными издержками;

- подача воздуха по шлангам при использовании на определенном участке и с правильной дозировкой может являться эффективным методом противодействия образованию запаха, но экономически нецелесообразна;

- использование химических средств, например, Нутриокса, является методом, приносящим мгновенный эффект, однако опыт коммунальных предприятий показывает, что этот метод относится к числу наиболее дорогостоящих (опыт Санкт-Петербурга (Аптекарский проспект, площадь Ленина и т.д.) показывает, что для нейтрализации запахов в тоннельных коллекторах возможно применение дезодорантов, которые представляют собой гели, содержащие летучие нейтрализаторы и комплекс натуральных и синтетических масел, гели размещаются в пластиковых коробках объемом 1000 мл, которые устанавливаются в колодцах на специальных опорах).

Ниже представлены сводная табл. 1 с методами, позволяющими в той или иной степени решать

Табл. 1. Методы, препятствующие появлению H₂S в сточных водахTable 1. Methods suppressing formation of H₂S in sewer water

Метод / Method	Способ осуществления метода / Method implementation	Недостатки метода / Method weaknesses
Аэрация сточных вод воздухом или техническим кислородом для создания аэробных условий и окисления сульфидов до сульфатов, окисление образованного H ₂ S / Sewage water aeration by the air or industrial oxygen to arrange for an aerobic conditions and oxygenation of sulphides to be converted into sulphates; oxygenation of newly formed H ₂ S	Инжективное насыщение кислородом (или кислорода) в специальных сооружениях / Air oxygen (or oxygen) injection inside specialized structures	При осуществлении метода с помощью воздуходувной станции наблюдаются существенные затраты на электроэнергию / The employment of an air blower house makes this method too costly due to high power consumption
Окисление образованного H ₂ S / Oxygenation of newly formed H ₂ S	Добавление химических реагентов в сточные воды (H ₂ O ₂ , Cl ₂ , NaClO, KMnO ₄ , CaO ₂ , MgO ₂ и т.п.) / Adding chemical agents into sewage water (H ₂ O ₂ , Cl ₂ , NaClO, KMnO ₄ , CaO ₂ , MgO ₂ , etc.)	Очень дорогой метод. В случае использования медленно высвобождающегося твердофазного кислорода (CaO ₂ , MgO ₂) в потоке сточных вод / A very expensive method in case of use of slow release solid phase oxygen (CaO ₂ , MgO ₂) in the sewage water flow
Перевод H ₂ S в нерастворимую форму / Insolubilization of H ₂ S	Добавление солей железа FeCl ₃ , Fe(Cl) ₂ , Fe(NO ₃) ₃ / Adding ferric sulphates FeCl ₃ , Fe(Cl) ₂ , Fe(NO ₃) ₃	Очень дорогой метод. Риск наполнения стока нежелательными анионами / A very expensive method. The risk of tank filling with anions
Превращение образованного H ₂ S до S в микробных топливных элементах (МТЭ) [81]* / Conversion of H ₂ S into S in microbial fuel cells [81]*	Устройство МТЭ в коллекторе / Installation of microbial fuel cells inside the tank	Технология МТЭ для использования в технологии очистки сточных вод до настоящего времени не развита и не используется в канализационных системах / The technology of microbial fuel cells is underdeveloped so far and it cannot be integrated into the sewage water treatment technology applied in sewer systems
Термическое окисление или прямое сжигание / Thermal oxidation or direct combustion	Применяют для устранения из газовых потоков горючих компонентов в основном органического происхождения при воздействии высоких температур / Applied to eliminate organic combustible components from gas flows under the impact of high temperatures	Дорогостоящий метод, поэтому применяется только для небольших расходов и агрессивных веществ. Удаление сероводорода термическим окислением кислородом воздуха требует высоких температур (более 1200 °C) и больших расходов топлива / An expensive method; it's applied in case of small costs and aggressive substances. Elimination of hydrogen sulphide by thermal oxidation needs high temperatures (over 1200 °C) and high fuel consumption
Каталитический метод / Catalyst method	В борьбе с дурно пахнущими запахами базируются на окислении вредных примесей на поверхности катализатора / Oxidation of hazardous admixtures on the surface of a catalyst	Необходимость предварительной тщательной очистки воздуха от механических загрязнений и аэрозольных частиц. Высокая стоимость катализаторов обуславливает необходимость их регенерации, что усложняет технологический процесс / The need for thorough pre-treatment of air and elimination of mechanic pollutants and aerosol particles High costs of catalysts require their regeneration, which complicates the process
Фотокаталитический метод / Photocatalytic method	В качестве фотокатализаторов используют полупроводниковые оксиды или сульфиды (TiO ₂ , ZnO, CdS и др.), в которых при поглощении света возникают пары «электрон — дырка», способные генерировать свободные радикалы / Semiconducting oxides or sulphides are used as photocatalysts (TiO ₂ , ZnO,	Низкая квантовая эффективность фотокатализатора 0,1–0,5 %. Продукты реакций могут «отравлять» или загрязнять поверхность фотокатализатора. Пыль и жировые примеси загрязняют поверхность, в результате чего экранируют ее от УФ-излучения, а также не позволяют молекулам примеси достичь поверхности фотокатализатора / Low quantum efficiency of a photocatalyst equal to 0.1–0.5%.

Окончание табл. 1 / The end of the table 1

Метод / Method	Способ осуществления метода / Method implementation	Недостатки метода / Method weaknesses
Фотокаталитический метод / Photocatalytic method	CdS, etc.), if they adsorb light, they generate “electron-hole” couples capable of generating free radicals	Reaction products can pollute the surface of a photocatalyst. Dust and fat admixtures pollute the surface, protect it from UV emission and prevent molecules of admixtures from reaching the surface of the photocatalyst
Фотохимический метод / Photochemical method	При воздействии ультрафиолетового излучения с длиной волны менее 200 нм в воздухе эффективно идут процессы диссоциации кислорода и воды с образованием атомарного кислорода и радикалов OH / UV emissions, having the wave length of, at least, 200 nm, promote effective oxygen/water dissociation processes causing the formation of atomic oxygen and OH radicals	Необходимость большого запаса по мощности для предотвращения проскоков при пиковых нагрузках, возникающих при эксплуатации / The need for the surplus capacity to prevent the breakthrough at peak load in the course of operation

Примечание: *Микробные топливные элементы (МТЭ) — это электрохимические устройства, способные трансформировать химическую энергию в электрическую за счет метаболической активности микроорганизмов, электрон-транспортные цепи (ЭТЦ) которых способны осуществлять перенос электронов на внешние нерастворимые акцепторы.
Note: *Microbial fuel cells (MFCs) are electrochemical devices capable of transforming convert chemical energy into electrical energy due to the metabolic activity of microorganisms, electron-trans.

проблемы, связанные с предотвращением появления сероводорода, являющегося одним из основных компонентов дурно пахнущих газов, и табл. 2 с ориентировочными финансовыми затратами при использовании различных реагентов для борьбы с сероводородом в сточных водах.

На основании табл. 2 можно сделать вывод, что одним из экономичных способов борьбы с се-

роводородом является использование технического кислорода, что уступает только применению свободной азотной кислоты. Стоимость использования атмосферного воздуха главным образом обусловлена затратами на электроэнергию, потребляемую компрессором.

ВЫВОДЫ

Основной принцип поиска решений по локализации дурно пахнущих газов в системе канализации должен состоять в предотвращении их появления и лишь потом в их устранении.

Для достижения эффекта устранения дурно пахнущих запахов необходимо проведение мониторинга системы канализации с использованием подвижных установок и иных устройств, которые позволяют моделировать процесс эксплуатации сетей водоотведения, выявлять наиболее уязвимые места, способствовать недопущению аварий, снизить денежные затраты на эксплуатацию и ремонт трубопроводов.

В целях выявления наиболее эффективных, оперативных и экономически выгодных вариантов фиксации и нейтрализации дурно пахнущих газов на конкретных объектах необходимы фундаментальные инженерные проработки, включающие сопоставление альтернативных методов на базе проведения технико-экономических расчетов; при этом необходимо учитывать, что образование запаха в большой зоне водосбора может быть устранено не каким-то одним методом, а комбинацией возможных решений.

Табл. 2. Финансовые затраты при использовании различных реагентов для борьбы с сероводородом в сточных водах (по данным Центра эффективного использования водных ресурсов Университета штата Квинсленд, Австралия) [82]

Table 2. Financial costs broken down by various reactants used to eliminate the hydrogen sulphide content in the sewage water (according to Advanced Water Management Centre, Queensland, Australia) [82]

Применяемый реагент / Reactant	Затраты, долл./м ³ сточных вод / Costs, dollar/m ³ of sewage water	Затраты, долл./кг серы / Costs, dollar/kg of sulphur
Ca(NO ₃) ₂	0,07–0,12	11–19
Ca(NO ₃) ₂	0,6	24
NaNO ₃	—	3,4
FeCl ₂	0,1	11,5
FeCl ₃	0,07	5
FeSO ₄ ·7H ₂ O	—	6,5
Свободная азотистая кислота / Free nitrous acid	0,03	2,2
Кислород / Oxygen	0,04	4,7
Воздух / Air	0,11	—

Формирование плана мероприятий по предотвращению и устранению запаха должно начинаться при проектировании канализационных сетей с определения необходимых условных проходов трубопроводов, уклонов каналов, а также выбора расположения насосных станций и очистных сооружений с учетом перспектив строительства тру-

бопроводов и подключения к канализационной сети новых участков.

Продолжение исследований по мерам локализации агрессивных и дурно пахнущих газов должно согласовываться с решением вопросов организации эффективной вентиляции канализационных стояков в конкретных зданиях и сооружениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Столберг Ф.В.* Экология города. К. : Либра, 2000. 464 с.
2. *Gostelow P., Parsons S.* Sewage treatment works odour measurement // *Water Sci. Technol.* 2000. Vol. 41. Issue 6. Pp. 33–40.
3. *Кофман В.Я.* Сероводород и метан в канализационных сетях // *Водоснабжение и санитарная техника.* 2012. № 11. С. 72–78.
4. *Stuetz R., Frechen F.B.* Odours in Wastewater Treatment. Published by IWA Publishing, London SW1H 0QS, 2001. 436 p.
5. *Майоров В.А.* Запахи: их восприятие, воздействие, устранение. М. : Мир, 2006. 366 с.
6. *Волоник Г.И., Терехов Л.Д., Сошников Е.В., Стеблевский В.И.* Техническая эксплуатация коммунальных систем водоснабжения и водоотведения. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2008. 195 с.
7. *Parker W.J., Ryan H.* A Tracer Study of Headspace Ventilation in a Collector Sewer // *Journal of the Air & Waste Management Association.* 2011. № 12. Pp. 581–592.
8. *Lehua Z.* Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems // *Water research.* 2008. No. 42. Pp. 1–12.
9. *Sun X.* Impact of fluctuations in gaseous H₂S concentrations on sulfide uptake by sewer concrete: the effect of high // *Water Research.* 2015. № 81. Pp. 84–91.
10. *Kyoo Hong P.* Mitigation strategies of hydrogen sulphide emission in sewer networks: a review // *International Biodeterioration & Biodegradation.* 2014. Vol. 95. Pp. 251–261.
11. *Gutierrez O.* Assessment of pH shock as a method for controlling sulfide and methane formation in pressure main sewer systems // *Water research.* 2014. Vol. 48. Pp. 569–578.
12. *Michael D.* Municipal gravity sewers: An unrecognised source of nitrous oxide // *Science of the Total Environment.* 2014. Vol. 468–469. Pp. 211–218.
13. *Wells T., Melchers R.E.* Modelling concrete deterioration in sewers using theory and field observations // *Cement and Concrete Research.* 2015. Vol. 77. Pp. 82–96.
14. *Васильев В.М., Панкова Г.А., Столбихин Ю.В.* Разрушение канализационных тоннелей и сооружений на них вследствие микробиологической коррозии // *Водоснабжение и санитарная техника.* 2013. № 9. С. 55–61.
15. *VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft. Olfaktometrie – Bestimmung der hedonischen Geruchswirkung,* 2003.
16. *Цибульский В.В., Яценко-Хмелевская М.А., Хитрина Н.Г., Короленко Л.И.* Подходы к нормированию запаха в атмосферном воздухе России на основе ольфактометрических измерений запаха в промышленных выбросах // *Экологическая химия.* 2011. Т. 20. Вып. 1. С. 1–10.
17. *Другов Ю.С., Зенкевич И.Г., Родин А.А.* Газохроматографическая идентификация загрязнений воздуха, воды, почвы и биосред. М. : Бином. Лаборатория знаний, 2005. 81 с.
18. *Kim J., Lim, J., Friedman J., Lee U.* SewerSnort: A Drifting Sensor for In-situ Sewer Gas Monitoring // *Sixth Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks.* 2009.
19. *Барабаш Н.В.* Биохимические методы очистки сточных вод. Ставрополь : Изд-во СКФУ, 2015. 98 с.
20. *Серпокрылов Н.С.* Экология очистки сточных вод физико-химическими методами. М. : АСВ, 2009. 262 с.
21. *Харькина О.В.* Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод. Волгоград : Панорама, 2015. 433 с.
22. *Диденко Е.А., Хромченко Я.Л., Светлополюнский В.А.* Влияние состава транспортируемых сточных вод на состояние канализационных трубопроводных систем // *Водоснабжение и санитарная техника.* 2002. № 5. С. 33–35.
23. *Захаров Ю.С., Орлов В.А.* Восстановление водоотводящих сетей полимерными рукавами. М. : РУСАЙНС, 2017. 108 с.
24. *Орлов В.А., Хренов К.Е., Орлов Е.В.* Инженерно-технологическая реконструкция систем водоснабжения и водоотведения. М. : АСВ, 2019. 279 с.
25. *Саломеев В.П., Гогина Е.С., Орлов В.А., Макиша Н.А.* Реконструкция систем и сооружений водоотведения. М. : Изд-во Моск. гос. строит. ун-та, 2017. 232 с.
26. *Сайриддинов С.Ш.* Гидравлика систем водоснабжения и водоотведения. М. : АСВ, 2012. 352 с.

27. Васильев В.М., Столбихин Ю.В. Выбор оптимального варианта транспортирования жидкости по водоводам большой протяженности по территории с наличием резкого перепада высотных отметок // Актуальные проблемы строительства и архитектуры : мат. Междунар. науч.-практ. конф. студ., асп., мол. уч. и докт. ч. 2. 2012. С. 38–40.
28. Столбихин Ю.В. Исследование процесса эжекции воздуха в камере гашения напора // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 3 (50). С. 202–210.
29. Васильев В.М., Столбихин Ю.В. Выбор конструкции приемных камер после напорных водоводов и их расчет // Актуальные проблемы современного строительства : 64-я Междунар. науч.-техн. конф. мол. уч. ч. 1. 2011. С. 249–250.
30. Моргунов К.П. Насосы и насосные станции. СПб. : ЛАНЬ, 2003. 308 с.
31. Рублевская О.Н. Мероприятия по предотвращению распространения неприятных запахов на объектах ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 10. С. 46–55.
32. Чупин Р.В., Нгуен Туан Ань. Оптимальная реконструкция канализационных сетей // Водоснабжение и санитарная техника. 2015. № 2. С. 58–68.
33. Васильев В.М., Столбихин Ю.В. Условия применения приемно-разгрузочных камер (камер гашения) после напорных водоводов и их расчет // Технологии мира. 2012. № 06 (44). С. 27–34.
34. Ивановский И.Г., Макишин В.Н. Вентиляция шахт. Владивосток : ДВГТУ, 2007. 241 с.
35. Васильев В.М., Малков А.В. Места образования агрессивных газов в канализационной сети // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 1. С. 66–74.
36. Малков А.В. Расчет требуемой кратности газообмена в подсводном пространстве канализационной сети // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 2 (61). С. 140–144.
37. Vasilyev V., Stolbikhin Y. Inspecting and monitoring the technical condition of sewage collectors // Trans Tech Publications, Switzerland, Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 725–726. Pp. 1319–1324.
38. Joyce J., Hunniford Ch., Plummer A. Implementing vapor phase odor control on large diameter interceptor systems // Biosolids and Odor and Corrosion, Conference & Expo. 2013. Pp. 1–31.
39. Kuliczowski A., Kuliczowska E., Zwierzchowska A. Technologie beswykopowe w inzynierii srodowiska. Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. Kielce, 2010. 735 p.
40. Bremond B., Konig A., Le Gat Y., Saegrov S., Torterotot J.-Ph., Werey C. Vers une maintenance et une rehabilitation preventives des reseaux d'assainissement // Techn., sci., meth. 2004. No. 9. Pp. 71–75.
41. Орлов В.А., Хренов К.Е. Диагностика трубопроводных сетей. М. : АСВ, 2018. 100 с.
42. Чистякова А.В., Орлов В.А., Чухин В.А. Диагностика технического состояния металлических трубопроводов // Природообустройство. 2016. № 2. С. 48–54.
43. Бахир В.И. Обеззараживание воды: проблемы и решения // Водаmagazine. 2008. № 5 (117). С. 36–40.
44. Семенова И.В., Мишутова М.В. Бактерицидно-химические свойства хлорсодержащих дезинфектантов, применяемых при очистке сточных вод // Энергосбережение и водоподготовка. 2012. № 3. С. 42–46.
45. Фесенко Л.Н., Игнатенко С.И. Обеззараживание воды низкоконцентрированным гипохлоритом натрия: от дискуссий к внедрению // Водоснабжение и канализация. 2009. № 7. С. 97–103.
46. ООО Озон-Монтаж Эффективное оборудование для очистки воды озонированием // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение 2009. № 8. С. 43–50.
47. Костюченко С.В., Волков С.В., Кузьмин А.В., Лысый Е.О., Ортель В., Давыдов Д.В. и др. Опыт внедрения современных систем обеззараживания ультрафиолетовым излучением // Водаmagazine. 2017. № 5 (117). С. 16–19.
48. Ульянов А.Н., Балакин С.К. Особенности интенсификации процесса обеззараживания воды ультрафиолетом и ультразвуком // Водоснабжение и канализация. 2011. № 1. С. 37–42.
49. Лебедев Н.М., Тихонов М.А., Казуков О.В., Лебедев О.Ю., Киреева З.В., Кузнецова О.Б. Исследование совместного влияния ультрафиолетового облучения (УФО) и ультразвуковой обработки (УЗО) на динамику окислительно-восстановительных процессов в водной среде // Материалы VI Конгресса обогатителей стран СНГ, II том, 28–30 марта 2007. С. 234–237.
50. Чекалов Л.В. Формула газоочистки. Ярославль : Ньюанс, 2008. 74 с.
51. Николаев В.В., Бусыгина Н.В., Бусыгин И.Г. Основные процессы физической и физико-химической переработки газа. М. : Недра, 1998. 184 с.
52. Родионов А.И., Кузнецов Ю.П., Соловьев Г.С. Защита биосферы от промышленных выбросов. Основы проектирования технологических процессов. М. : Химия, КолосС, 2005. 392 с.
53. Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод / пер. с англ. М. : Мир, 2006. 480 с.
54. Малышева А.А. Биофильтрация как способ дезодорации газовых выбросов при работе станций аэрации // Интернет-вестник ВолГАСУ. Сер. : Политематическая. 2014. Вып. 4 (35).
55. Штокман Е.А. Очистка воздуха. М. : АСВ, 2007. 312 с.
56. Климов Е.С., Бузаева М.В. Природные сорбенты и комплексоны в очистке сточных вод. Ульяновск, УлГТУ, 2011. 201 с.

57. Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы). Пенза : Изд-во Пенз. технол. ин-та, 2004. 296 с.
58. Melo D.M.A., de Souza J.R., Melo M.A.F., Martinelli A.E., Cachima G.Y.B., Cunha J.D. Evolution of the zinox and zeolite materials as adsorbents to remove H₂S from natural gas // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2006. Vol. 272. Pp. 32–36.
59. Милов А.Г., Соломонов А.Б., Глушанкова И.С., Морозовский А.И., Вайсман Я.И. Опыт применения озонирования для очистки промышленных и хозяйственных стоков // *Научные исследования и инновации*. 2010. Т. 4. № 3. С. 56.
60. Юшин В.В., Попов В.М., Кукин П.П. и др. Техника и технология защиты воздушной среды. М. : Высшая школа, 2005. 391 с.
61. Zhang L. Chemical and biological technologies for hydrogen sulphide emission control in sewer systems // *Water Research*. 2008. № 42. Pp. 1–12.
62. Canela C., Alberici R.M., Jardim W.F. Gas phase destruction of H₂S using TiO₂/UV-VIS // *Journal of Photochemistry and Photobiology, Chemistry*. 1998. № 112. Pp. 73–80.
63. Ma H., Chen P., Ruan R. H₂S and NH₃ removal by silent discharge plasma and ozone combi-system // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2001. Vol. 21. No. 4. Pp. 611–624.
64. Соколова И.В., Чайковская О.Н. Фотохимические методы для решения природоохранных задач. Томск : Издательский дом ТГУ, 2016. 256 с.
65. Ishmuratov R., Orlov V., Andrianov A. The spiral wound pipeline rehabilitation technique for pipe networks: An application and experience in Moscow City // 31 NO-DIG International Conference and Exhibition, NO-DIG Down Under. 2013. Pp. 1–7.
66. Bergue J.-M., Joussin J.-M., Orditz D., Thépot O. New design of liners in gravity flow pipes French recommendations 3R-2014 // 32 International NO-DIG Conference, Madrid, 13–15 October 2014. Ref. 6A-4. Pp. 1–10.
67. Schmager K.-D. Overblew of spiral-wound pipe lining technologies // 29 NO-DIG International Conference and Exhibition, NO-DIG Berlin 2011. Paper 2B-4. Pp. 1–10.
68. Rameil M. Handbook of pipe bursting practice. Vulkan verlag, 2007. 351 p.
69. Kuliczowski A. Rury kanalizacyjne. Wydawnictwo Politechniki Swietokrzyskiej, 2004. 507 p.
70. Орлов В.А., Орлов Е.В., Шлычков Д.И. Защитные полимерные покрытия для трубопроводов систем водоснабжения и водоотведения // *Вестник МГСУ*. 2009. № 4. С. 167–171.
71. Bremond B., Konig A., Le Gat Y., Saegrov S., Torterotot J.-Ph., Wery C. Vers une maintenance et une rehabilitation preventives des reseaux d'assainissement // *Techn., sci., meth.* 2004. № 9. Pp. 71–75.
72. Zwierzchowska A. Technologie bezwykowej budowy sieci gazowych, wodociagowych i kanalizacyjnych. Politechnika swietokrzyska, 2006. 180 p.
73. Харькин В.А. Замена трубопроводов из традиционных материалов на пластмассовые. Технологические схемы и структура процессов // *Журнал РОБТ*. 2002. № 1. С. 20–23.
74. Храменков С.В. Стратегия модернизации водопроводной сети. М. : Стройиздат, 2005. 398 с.
75. Рыбаков А.П. Основы бестраншейных технологий. М. : ПрессБюро № 1, 2005. 304 с.
76. Thewes M., Kamarianakis S., Bielecki R. Decision making for underground infrastructure // 29 NO-DIG International Conference and Exhibition, NO-DIG Berlin 2011. Paper 2B-4. Pp. 1–10.
77. Pinguet J.-F., Meynardie G. Reseaux d'assainissement: du diagnostic a la rehabilitation // *Eau, industry, nuisances*. 2006. No. 295. Pp. 39–43.
78. Karsten M. Zustandserfassung von Kanalisationen. WWT: Wasserwirt. Wassertechn. 2007. No 3. Pp. 10–15.
79. Barsom J., Nyierenda S., Vega-Bazan E. An emergency large diameter CIPP repair // 32 International NO-DIG Madrid. 2014. Pp. 1–8.
80. Matsumoto F., Morita T., Sakai E., Shimoda H., Sasaoka T., Matsui K. New pipe-jacking method in connecting new pipeline to the existing underground structure // NO-DIG 2014, Madrid (Spain). Ref. 5A-3.
81. Gorby J.A. Electrically conductive bacterial nanowires produces by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 2006. Vol. 103. Pp. 11358–11363.
82. Rabaey K., Sompel L., Maignien N., Boon P. et al. Microbial fuel cells for sulfide removal // *Environ. Sci. Technol.* 2006. Vol. 40. Pp. 5218–5224.

Поступила в редакцию 20 сентября 2019 г.

Принята в доработанном виде 11 октября 2019 г.

Одобрена для публикации 27 февраля 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Александрович Орлов — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водоснабжения и водоотведения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 507689; OrlovVA@gic.mgsu.ru;

Алексей Вячеславович Саймулов — магистрант кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 991711; voda@mgsu.ru;

Ольга Валериевна Мельник — аспирантка кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; voda@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Stolberg F.V. *Ecology of the city*. Kiev, Libra, 2000; 446. (rus.).
2. Gostelow P., Parsons S. Sewage treatment works odour measurement. *Water Sci. Technol.* 2000; 41(6):33-40.
3. Kofman V.Ya. Hydrogen sulfide and methane in sewer networks. *Water supply and sanitary equipment*. 2012; 11:72-78. (rus.).
4. Stuetz R., Frechen F.B. *Odours in Wastewater Treatment*. Published by IWA Publishing, London SW1H 0QS, 2001; 436.
5. Mayorov V.A. Smells: their perception, impact, elimination. Moscow, Mir, 2006; 366. (rus.).
6. Volonik G.I., Terekhov L.D., Soshnikov E.V., Steblevsky V.I. *Technical operation of municipal water supply and sanitation systems*. Khabarovsk, DVGUPS Publishing House, 2008; 195. (rus.).
7. Parker W.J., Ryan H. A Tracer Study of Head-space Ventilation in a Collector Sewer. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2011; 12:581-592.
8. Lehua Z. Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems. *Water research*. 2008; 42:1-12.
9. Sun X. Impact of fluctuations in gaseous H₂S concentrations on sulfide uptake by sewer concrete: the effect of high. *Water Research*. 2015; 81:84-91.
10. Kyoohong P. Mitigation strategies of hydrogen sulphide emission in sewer networks: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2014; 95:251-261.
11. Gutierrez O. Assessment of pH shock as a method for controlling sulfide and methane formation in pressure main sewer systems. *Water research*. 2014; 48:569-578.
12. Michael D. Municipal gravity sewers: An unrecognised source of nitrous oxide. *Science of the Total Environment*. 2014; 468-469:211-218.
13. Wells T., Melchers R.E. Modelling concrete deterioration in sewers using theory and field observations. *Cement and Concrete Research*. 2015; 77:82-96.
14. Vasiliev V.M., Pankova G.A., Stolibikhin Yu.V. The destruction of sewer tunnels and structures on them due to microbiological corrosion. *Water supply and sanitary equipment*. 2013; 9:55-61. (rus.).
15. VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft. Olfaktometrie — Bestimmung der hedonischen Geruchswirkung, 2003
16. Tsubulsky V.V., Yatsenko-Khmelevskaya M.A., Khitrina N.G., Korolenko L.I. Approaches to normalization of odor in the atmospheric air of Russia on the basis of olfactometric measurements of odor in industrial emissions. *Ecological chemistry*. 2011; 20(1): 1-10. (rus.).
17. Drugov Yu.S., Zenkevich I.G., Rodin A.A. *Gas chromatographic identification of air, water, soil and biological media pollution*. Moscow, Binom. Laboratory of Knowledge, 2005; 81. (rus.).
18. Kim J., Lim, J., J. Friedman J., Lee U. Sewer-Snort: A Drifting Sensor for In-situ Sewer Gas Monitoring. *Sixth Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*. 2009.
19. Barabash N.V. *Biochemical methods of wastewater treatment*. Stavropol, Publishing house of SKFU, 2015; 98. (rus.).
20. Serpukrylov N.S. *Ecology of wastewater treatment by physicochemical methods*. Moscow, ASV, 2009; 262. (rus.).
21. Kharkina O.V. *Efficient operation and calculation of biological wastewater treatment facilities*. Volgograd, Panorama, 2015; 443. (rus.).
22. Didenko E.A., Khromchenko Ya.L., Svetlopolyansky V.A. The effect of the transported wastewater on the condition of sewer piping systems. *Water supply and sanitary equipment*. 2002; 5:33-35. (rus.).
23. Zakharov Yu.S., Orlov V.A. *Recovery of drainage networks with polymer sleeves*. Moscow, Ru-Science, 2017; 108. (rus.).
24. Orlov V.A., Khrenov K.E., Orlov E.V. *Engineering and technological reconstruction of water supply and sanitation systems*. Moscow, ASV, 2019; 279. (rus.).
25. Salomeev V.P., Gogina E.S., Orlov V.A., Makisha N.A. *Reconstruction of drainage systems and facilities*. Moscow, Moscow Publishing House. Gos. Builds. University, 2017; 232. (rus.).
26. Sayriddinov S.Sh. *Hydraulics of water supply and sanitation*. Moscow, ASV, 2012; 352. (rus.).
27. Vasiliev V.M., Stolibikhin Yu.V. The selection of the best option for transporting fluid over long water pipelines across the territory with a sharp difference in elevations. *Actual problems of construction and architecture: materials of the International Scientific and Practical Conference of students, graduate students, young scientists and doctoral students. Part 2 / M-in education and science, St. Petersburg, state architecture.-builds. Univ.*, 2012; 38-40. (rus.).

28. Stolbikhin Yu.V. Investigation of the process of air ejection in a pressure damping chamber. *Bulletin of civil engineers*. 2015; 3(50):202-210. (rus.).
29. Vasiliev V.M., Stolbikhin Yu.V. The choice of the design of the receiving chambers after pressure pipelines and their calculation. *Actual problems of modern construction: 64th International scientific and technical conference of young scientists. Part 1.* / St. Petersburg, state architecture.-builds. Univ., 2011; 249-250. (rus.).
30. Morgunov K.P. *Pumps and pumping stations*. St. Petersburg, Doe, 2003; 308. (rus.).
31. Rublevskaya O.N. Measures to prevent the spread of unpleasant odors at the facilities of the State Unitary Enterprise "Vodokanal of St. Petersburg". *Water supply and sanitary equipment*. 2013; 10:46-55. (rus.).
32. Chupin RV, Nguyen Tuan An Optimal reconstruction of sewer networks. *Water supply and sanitary equipment*. 2015; 2:58-68. (rus.).
33. Vasiliev V.M., Stolbikhin Yu.V. Application conditions for receiving and unloading chambers (quenching chambers) after pressure pipelines and their calculation. *Technologies of the world*. 2012; 06(44): 27-34. (rus.).
34. Ivanovsky I.G., Makishin V.N. *Mine ventilation*. Vladivostok, DVGUTU, 2007; 241. (rus.).
35. Vasiliev V.M., Malkov A.V. Places of formation of aggressive gases in the sewer network. *Water supply and sanitary equipment*. 2017; 1:66-74. (rus.).
36. Malkov A.V. Calculation of the required multiplicity of gas exchange in the underwater space of the sewer network. *Bulletin of civil engineers*. 2017; 2(61):140-144. (rus.).
37. Vasilyev V., Stolbikhin Y. Inspecting and monitoring the technical condition of sewage collectors. *Trans Tech Publications, Switzerland, Applied Mechanics and Materials*. 2015; 725-726:1319-1324.
38. Joyce J. Hunniford Ch., Plummer A. Implementing Vapor Phase Odor Control on Large Diameter Interceptor Systems. *Biosolids and Odor and Corrosion, Conference & Expo*. 2013; 1-31.
39. Kuliczkowski A., Kuliczowska E., Zwierzchowska A. *Technologie beswykopowe w inzynierii srodowiska*. Wydawnictwo Seidel-Przywecki Sp. Kielce, 2010; 735.(pol.).
40. Bremond B., Konig A., Le Gat Y., Saegrov S., Torterotot J.-Ph., Wery C. Vers une maintenance et une rehabilitation preventives des reseau d'assainissement. *Techn., sci., meth*. 2004; 9:71-75.(fr.).
41. Orlov V.A., Khrenov K.E. *Diagnostics of pipeline networks*. Moscow, ASV, 2018; 100. (rus.).
42. Chistyakova A.V., Orlov V.A., Chukhin V.A. Diagnostics of the technical condition of metal pipelines. *Environmental Engineering*. 2016; 2:48-54. (rus.).
43. Bahir V.I. Water disinfection: problems and solutions. *Watermagazine*. 2008; 5(117):36-40. (rus.).
44. Semenova I.V., Mishutova M.V. Bactericidal and chemical properties of chlorine-containing disinfectants used in wastewater treatment. *Energy saving and water treatment*. 2012; 3:42-46. (rus.).
45. Fesenko L.N., Ignatenko S.I. Water disinfection with low concentrated sodium hypochlorite: from discussions to implementation. *Water supply and sewerage*. 2009; 7:97-103. (rus.).
46. Ozon-Installation of Efficient equipment for water treatment by ozonation treatment water purification. *Water preparation. Water supply*. 2009; 8:43-50.
47. Kostyuchenko S.V., Volkov S.V., Kuzmin A.V., Lysy E.O., Ortel V., Davydov D.V. et al. Experience in the implementation of modern ultraviolet disinfection systems. *Watermagazine*. 2017; 5(117):16-19. (rus.).
48. Ulyanov A.N., Balakin S.K. Features of intensification of the process of water disinfection by ultraviolet and ultrasound. *Water supply and sewerage*. 2011; 1:37-42. (rus.).
49. Lebedev N.M., Tikhonov M.A., Kazukov O.V., Lebedev O.Yu. Kireeva Z.V., Kuznetsova O.B. Investigation of the joint effect of ultraviolet irradiation (UV) and ultrasonic treatment (RCD) on the dynamics of redox processes in the aquatic environment. *Materials of the VI Congress of Enrichers of the CIS Countries, Volume II, March 28–30, 2007*; 234-237. (rus.).
50. Chekalov L.V. *Gas cleaning formula*. Yaroslavl, Nuance, 2008; 74. (rus.).
51. Nikolaev V.V., Busygina N.V., Busygin I.G. *The main processes of physical and physico-chemical gas processing*. Moscow, Nedra, 1998; 184. (rus.).
52. Rodionov A.I., Kuznetsov Yu.P., Soloviev G.S. *Protection of the biosphere from industrial emissions. Basics of the design of technological processes*. Moscow, Chemistry, KolosS, 2005; 392. (rus.).
53. Hentze M., Armoes P., La-Kur-Jansen J., Arvan E. *Wastewater treatment* / trans. from English. Moscow, Mir, 2006; 480. (rus.).
54. Malysheva A.A. Biofiltration as a method of deodorizing gas emissions during operation of aeration stations. *Internet bulletin of VolgGASU. Ser.: Political*. 2014; 4(35). (rus.).
55. Shtokman E.A. *Air cleaning*. Moscow, ASV, 2007; 312. (rus.).
56. Klimov E.S., Buzaeva M.V. *Natural sorbents and complexones in wastewater treatment*. Ulyanovsk, UISTU, 2011; 201. (rus.).
57. Vetoshkin A.G., Tarantseva K.R. *Environmental protection technology (theoretical basis)*. Penza, Publishing House Penz. technol. Inst., 2004; 296. (rus.).
58. Melo D.M.A., de Souza J.R., Melo M.A.F., Martinelli A.E., Cachima G.Y.B., Cunha J.D. Evaluation of the zinox and zeolite materials as adsorbents to remove H₂S from natural gas. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2006; 272:32-36.
59. Mikov A.G., Solomonov A.B., Glushankova I.S., Morozovsky A.I. Vaysman Ya.I. Experience in the use of ozonation for the treatment of industrial and domestic wastewater. *Scientific research and innovation*. 2010; 4(3):56. (rus.).

60. Yushin V.V., Popov V.M., Kukin P.P. et al. *Technique and technology of air protection*. Moscow, Higher School, 2005; 391. (rus.).
61. Zhang L. Chemical and biological technologies for hydrogen sulphide emission control in sewer systems. *Water Research*. 2008; 42:1-12.
62. Canela C., Alberici R.M., Jardim W.F. Gas phase destruction of H₂S using TiO₂/UV-VIS. *Journal of Photochemistry and Photobiology, Chemistry*. 1998; 112:73-80.
63. Ma H., Chen P., Ruan R. H₂S and NH₃ removal by silent discharge plasma and ozone combo-system. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2001; 21(4):611-624.
64. Sokolova I.V., Tchaikovskaya O.N. *Photochemical methods for solving environmental problems*. Tomsk, Publishing House TSU, 2016; 256. (rus.).
65. Ishmuratov R., Orlov V., Andrianov A. The spiral wound pipeline rehabilitation technique for pipe networks: An application and experience in Moscow City. 31 *NO-DIG International Conference and Exhibition, NO-DIG Down Under*. 2013; 1-7.
66. Bergue J.-M., Joussin J.-M., Orditz D., Thépot O. New design of liners in gravity flow pipes French recommendations 3R-2014. 32 *International NO-DIG Conference*, Madrid, 13-15 October 2014. Ref. 6A-4. 1-10.
67. Schmager K-D. Overblew of spiral-wound pipe lining technologies. 29 *NO-DIG International Conference and Exhibition, NO-DIG*. Berlin, 2011; 2B-4:1-10.
68. Rameil M. *Handbook of pipe bursting practice*. Vulkan verlag, 2007; 351.
69. Kuliczowski A. *Rury kanalizacyjne*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2004; 507. (pol.).
70. Orlov V.A., Orlov E.V., Shlychkov D.I. Protective polymer coatings for pipelines of water supply and sanitation. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2009; 4:167-171. (rus.).
71. Bremond B., Konig A., Le Gat Y., Saegrov S., Torterotot J.-Ph., Wery C. Vers une maintenance et une rehabilitation preventives des reseaux d'assainissement. *Techn., sci., meth*. 2004; 9:71-75.
72. Zwierzchowska A. *Technologie bezwykopowej budowy sieci gazowych, wodociagowych i kanalizacyjnych*. Politechnika świętokrzyska, 2006; 180. (pol.).
73. Kharkin V.A. Replacing pipelines from traditional materials to plastic. Technological schemes and structure of processes. *Journal of ROBT*. 2002; 1:20-23. (rus.).
74. Khramenkov S.V. *Water supply network modernization strategy*. Moscow, Stroyizdat, 2005; 398. (rus.).
75. Rybakov A.P. *Basics of trenchless technology*. Moscow, Press Bureau No. 1, 2005; 304. (rus.).
76. Thewes M., Kamarianakis S., Bielecki R. Decision making for underground infrastructure. 29 *NO-DIG International Conference and Exhibition, NO-DIG*. Berlin 2011. Paper 2B-4. 1-10.
77. Pinguet J.-F., Meynardie G. Reseaux d'assainissement: du diagnostic a la rehabilitation. *Eau, industrie, nuisances*. 2006; 295:39-43. (fr.).
78. Karsten M. Zustandserfassung von Kanalisationen. *WWT: Wasserwirt. Wassertechn.* 2007; 3:10-15. (ger.).
79. Barsoom J., Nyierenda S., Vega-Bazan E. An emergency large diameter CIPP repair. 32 *International NO-DIG*. Madrid, 2014; 1-8.
80. Matsumoto F., Morita T., Sakai E., Shimoda H., Sasaoka T., Matsui K. New pipe-jacking method in connecting new pipeline to the existing underground structure. *NO-DIG 2014*, Madrid (Spain). Ref. 5A-3.
81. Gorby J.A. Electrically conductive bacterial nanowires produces by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 2006; 103:11358-11363.
82. Rabaey K., Sompel L., Maignien N., Boon P. et al. Microbial fuel cells for sulfide removal. *Environ. Sci. Technol.* 2006; 40:5218-5224.

Received September 20, 2019.

Adopted in a revised form on October 11, 2019.

Approved for publication February 27, 2020.

BIONOTES: **Vladimir A. Orlov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, head 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: 507689; OrlovVA@gic.mgsu.ru;

Alexey V. Saimullov — master's student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 991711; voda@mgsu.ru;

Olga V. Melnik — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; voda@mgsu.ru.

Исследование дисперсного состава пыли городской среды

В.Н. Азаров¹, А.А. Кузьмичев¹, Д.А. Николенко²,
А.Н. Васильев³, Е.Ю. Козловцева¹

¹ Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); г. Волгоград, Россия;

² Донской государственный технический университет (ДГТУ); г. Ростов-на-Дону, Россия;

³ Комитет транспорта и дорожного хозяйства Волгоградской области; г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время в связи повышенным уровнем фоновых концентраций загрязняющих веществ в воздушной городской среде, вызванным экологическими факторами и увеличивающимся ежегодно в большей степени за счет антропогенных процессов, таких как промышленность, транспорт, жилищно-коммунальное хозяйство, атмосферный воздух городской среды нуждается в защите. Одним из основных экологических факторов, который негативно воздействует на воздух, является пыль. Рассмотрены теоретические закономерности дисперсного (фракционного) состава пыли, содержащейся в городской атмосфере, проведены натурные исследования загрязнения воздуха атмосферным аэрозолем городской среды (ААГС), а также рассмотрена возможность применения усеченного логарифмически нормального закона распределения для характеристики дисперсного состава ААГС.

Материалы и методы. Использован комплекс базовых и современных методов сбора и обработки информации, позволивших получить обладающие научной новизной результаты: метод оценки дисперсного (фракционного) состава пыли, методы планирования эксперимента, методы математического моделирования и др. Произведено сравнение полученных ранее результатов других авторов по рассматриваемой тематике с результатами практических исследований. Установлено качественное и количественное совпадение результатов с имеющимися в независимых источниках.

Результаты. Выявлено, что интегральные кривые распределения объема частиц пыли по эквивалентным диаметрам, построенные в вероятностно-логарифмической системе координат, имеют вид усеченного логарифмически нормального распределения, который получается из классического логарифмически нормального распределения за счет ограничения интервала возможных значений случайной величины. Данные интегральные кривые являются реализацией случайной функции, где параметр случайной функции — диаметр частиц d_e , мкм.

Выводы. Дисперсный состав пыли — важная характеристика для оценки загрязнения воздушной среды, а также снижения концентрации ААГС в воздухе. Исследования закономерностей дисперсного состава пыли, содержащейся в атмосферном воздухе городской среды, являются актуальными, так как они способствуют решению целого ряда задач, связанных с повышением экологической безопасности городской среды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: атмосферный воздух, пыль, атмосферный аэрозоль городской среды, дисперсный состав пыли, фракционный состав пыли, случайный процесс, случайная величина

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Азаров В.Н., Кузьмичев А.А., Николенко Д.А., Васильев А.Н., Козловцева Е.Ю. Исследование дисперсного состава пыли городской среды // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 3. С. 432–442. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.432-442

The research of dust dispersed composition of urban environment

Valeriy N. Azarov¹, Andrey A. Kuzmichev¹, Denis A. Nikolenko²,
Anatoliy N. Vasilev³, Elena Yu. Kozlovtsseva¹

¹ Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation;

² Don State Technical University (DSTU); Rostov-on-Don, Russian Federation;

³ Committee of Transport and Road Facilities of the Volgograd Region; Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Presently, the atmosphere of urban environments needs protection due to excessive ambient air pollutant concentrations. Each year these concentrations go up, triggered by environmental factors and anthropogenic processes, such as industry, transport, housing and utilities infrastructure. Dust is one of the main ecological factors that have a negative impact on the air. The co-authors have analyzed theoretical regularities governing the fractional composition of dust in the urban atmosphere, field tested the air polluted by the atmospheric aerosol in urban areas, and studied the applicability of truncated normal distribution law to particle size distribution in the atmospheric aerosol.

Materials and methods. The co-authors employed a set of conventional and advanced information collection and processing methods that enable researchers to deliver novelty-intensive results, including methods of dust particle size distribution

assessment, experimental design, mathematical modeling, etc. The co-authors have benchmarked the earlier results against the findings of this research to identify their qualitative and quantitative compliance with the results published in independent sources.

Results. The co-authors have found that integral curves describing dust particle distribution over equivalent diameters, constructed in the coordinate system of logarithmic probability, represent truncated normal distribution, derived from classical normal distribution by limiting the interval of possible variables for random values. These integral curves are an implementation of a random function where a random function parameter represents d_{particle} , μm .

Conclusions. Size distribution of dust particles is an important characteristic of air pollutions that can help to reduce concentration of the atmospheric aerosol in the air. Studies of dust particle size regularities, typical for an urban atmosphere, are particularly relevant because they contribute to the resolution of several problems of environmental safety in an urban environment.

KEYWORDS: atmosphere air, dust, atmospheric aerosol, dust particle size distribution, factional composition of dust, random process, random value

FOR CITATION: Azarov V.N., Kuzmichev A.A., Nikolenko D.A., Vasilev A.N., Kozlovtsseva E.Yu. The research of dust dispersed composition of urban environment. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(3):432-442. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.432-442 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Современные урбанизированные территории характеризуются возрастающим количеством офисных зданий, объектов промышленности, а также высокой плотностью автомобильного транспорта. Качество городского атмосферного воздуха — одна из наиболее острых экологических проблем современности во всем мире. Загрязнение атмосферного воздуха городов увеличивается в связи с присутствием пыли, представляющей собой твердые частицы, которые находятся в воздухе под влиянием воздушных течений и оседают на различных поверхностях под воздействием силы земного притяжения или вместе с осадками. Образование пыли связано как с естественными (природными) процессами, такими как выветривание, разрушение горных пород, вулканическая активность, космическая пыль, так и с антропогенными процессами, такими как промышленность, сельское и жилищно-коммунальное хозяйство, транспортная активность [1, 2]. Наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха мелкодисперсными частицами вносят следующие виды промышленности: целлюлозная, угольная, лесная, производство стали, цветная металлургия, карьерные разработки, транспорт. По результатам исследований, проведенных российскими и зарубежными учеными, около 60 % пыли, которая отделяется от автомобильных шин при движении по асфальтобетонному покрытию, имеет размеры частиц до 10 мкм. На основании исследований, проведенных Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ), увеличение предельно допустимой концентрации пыли, в том числе мелкодисперсных частиц PM10 и PM2.5, в атмосферном воздухе городов грозит возникновением у жителей заболеваний дыхатель-

ной и сердечно-сосудистой систем [3]. Таким образом, исследования, направленные на повышение экологической безопасности городской среды [1, 2, 4–11] за счет изучения свойств пыли, а именно ее дисперсного (фракционного) состава, являются актуальными.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретические исследования закономерностей дисперсного состава пыли

В 1941 г. А.Н. Колмогоров исходя из простых предположений показал, что в процессе дробления (измельчения) твердых частиц логарифмы их размеров приближенно подчиняются гауссовскому (нормальному) закону распределения, т.е. рассматривается случайный процесс за время t [12]:

$$\frac{\bar{N}(r, t)}{\bar{N}(t)} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2\pi t} B} \int_{-\infty}^x \exp \left[-\frac{(x - At)^2}{2B^2 t} \right] dx, \quad (1)$$

где $\bar{N}(t)$ — математическое ожидание общего числа $N(t)$ частиц к моменту времени t ; $\bar{N}(r, t)$ — математическое ожидание числа частиц $N(r, t)$ с размерами $r \leq r$ к моменту времени t ; x — стандартное отклонение логарифмов диаметров; A — медиана распределения; B — среднеквадратическое отклонение логарифмов диаметров от их среднего значения.

На основании результатов исследований А.Н. Колмогорова, а также исследований дисперсного состава большого числа пыли и порошков с постоянной плотностью частиц П.А. Коузов предложил функцию логарифмически нормального распределения массы пыли по диаметрам частиц использовать в следующем виде [13]:

$$D(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma} \int_{-\infty}^{\lg d} \exp \left[-\frac{(\lg d - \lg d_{50})^2}{2 \lg^2 \sigma} \right] d \lg d, \quad (2)$$

где d_{50} — медиана распределения; $\lg d$ — стандартное отклонение логарифмов диаметров; $\lg \sigma$ — среднеквадратическое отклонение логарифмов диаметров от их среднего значения.

На наш взгляд, формулу (2) следует рассматривать как реализацию случайной функции (1), где параметр случайной функции — диаметр частиц. Это особенно характерно для атмосферного аэрозоля городской среды (ААГС) [14]. Еще в 1957 г. М.М. Федоров под руководством А.Н. Колмогорова показал, что желательно исследовать характер распределения частиц по размерам для гетерогенных аэрозолей, содержащих частицы различного происхождения. Таким гетерогенным аэрозолем является нижний слой

атмосферного воздуха в индустриальном городе [15]. ААГС представляет собой как частицы пыли природного и антропогенного происхождения, так и целый спектр загрязняющих веществ, среди которых бактерии, сажа, вирусы и прочие контаминанты. Нами осуществлена проверка подчиняемости дисперсного состава ААГС логарифмически нормальному закону распределения.

Натурные исследования загрязнения воздуха ААГС

Основываясь на методике учета межрайонного переноса загрязняющих веществ, в частности пыли, наибольшую удельную нагрузку загрязнений на атмосферный воздух г. Волгограда испытывают Центральный, Ворошиловский, Краснооктябрьский и Тракторозаводский районы [16] (рис. 1).

В данных районах города расположено большое количество промышленных предприятий, а так-

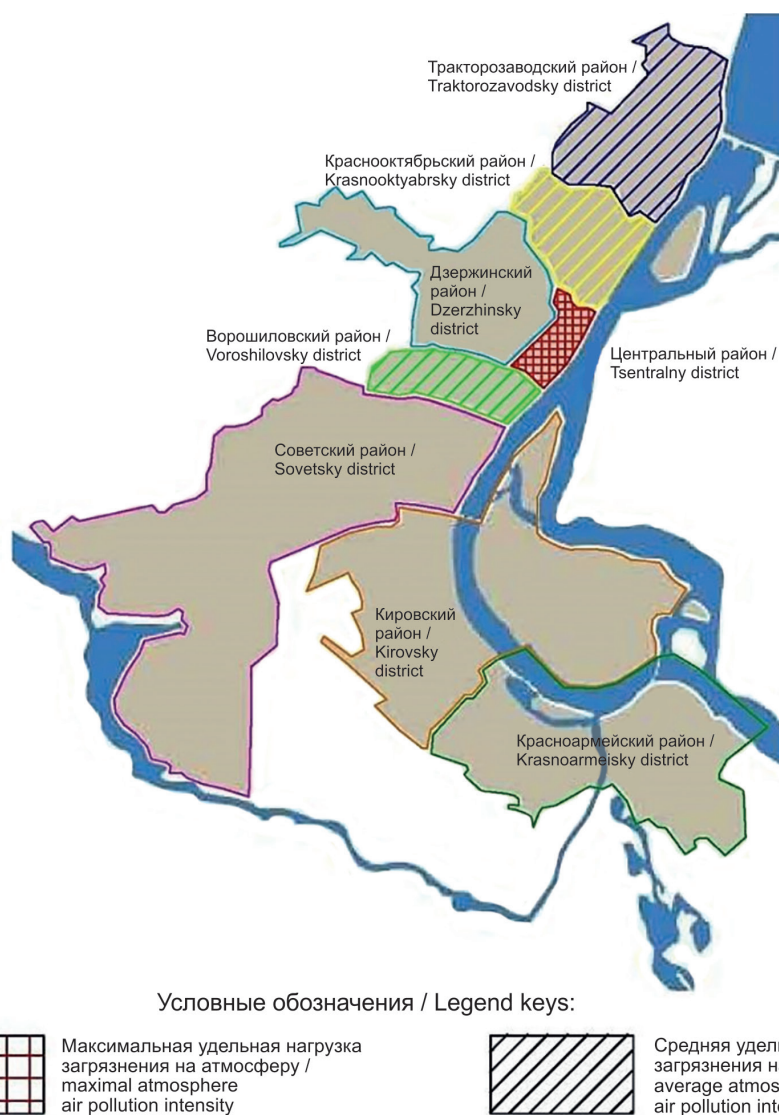


Рис. 1. Удельная нагрузка загрязнений на атмосферный воздух районов г. Волгограда

Fig. 1. Atmosphere air pollution intensity in Volgograd districts

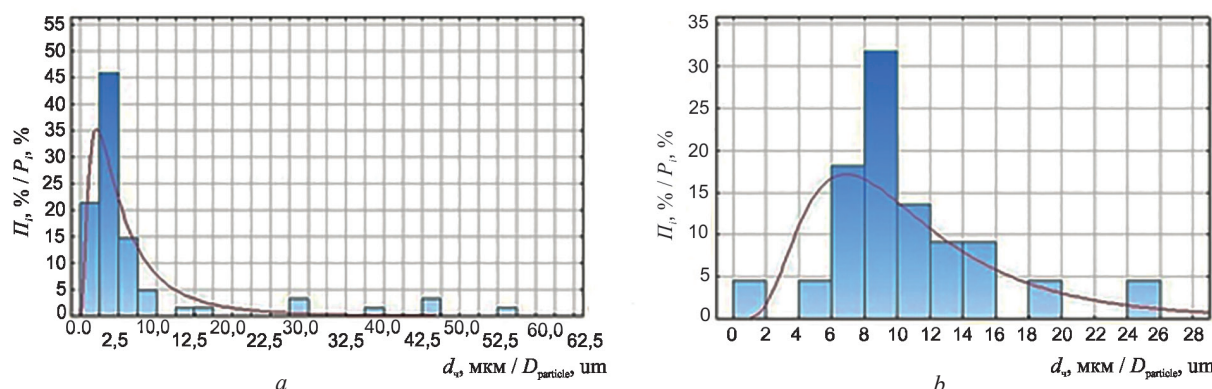


Рис. 2. Гистограмма распределения объема частиц пыли по эквивалентным диаметрам, отобранной с вертикальных поверхностей зданий и сооружений: *a* — осенью 2015 г. в урбанизированной среде; *b* — осенью 2016 г. в неурбанизированной среде

Fig. 2. Column chart of dust particle sizes over equivalent diameters. Dust particles sampled from vertical surfaces of buildings and structures: *a* — in an urban environment in autumn 2015; *b* — in a non-urban environment in autumn 2016

же основных автомобильных дорог, выбросы от которых негативно влияют не только на атмосферный воздух, но, в частности, и на внешний облик различных архитектурных объектов, представляющих собой исторический и культурный интерес. Рассмотрены образцы пыли, отобранные с вертикальных поверхностей зданий и сооружений в урбанизированной среде (Центральный район г. Волгограда) и в неурбанизированной среде (Среднеахтубинский район Волгоградской области) за многолетний период наблюдений (рис. 2). На рис. 2, *a* представлена гистограмма распределения объема частиц пыли по эквивалентным диаметрам, отобранной осенью 2015 г. с вертикальных поверхностей зданий и сооружений в урбанизированной среде. Размер измеренных частиц находится в диапазоне 0,8–57 мкм. Преобладающими размерами твердых частиц являются 2,5–5 мкм [1]. На рис. 2, *b* представлена гистограмма распределения объема частиц пыли по эквивалентным диаметрам, отобранной осенью 2016 г. с вертикальных поверхностей зданий и сооружений в неурбанизированной среде. Размер измеренных частиц находится в диапазоне: 1,25–43 мкм. Преобладающими размерами твердых частиц являются 8–10 мкм [1]. Поскольку полученные в ППП STATISTICA [17] экспериментальные значения критерия Колмогорова, а также критерия согласия Пирсона меньше их теоретических значений, то выборки подчиняются логарифмически нормальному закону распределения [18]. Установлено, что размер частиц в неурбанизированной среде более крупный [1, 2].

Осуществлено сравнение результатов практических исследований с результатами других авторов, полученных ранее. Изучен дисперсный состав кремниевой пыли, которая встречается в горнорудной, абразивной, химической, каменноугольной и других отраслях промышленности и является со-

ставной частью ААГС. Размер измеренных частиц находится в диапазоне от 0,5 до 450 мкм. Преобладающими размерами твердых частиц являются 5–20 мкм. Крупный размер частиц объясняется тем, что в производственной среде частицы кремнеземистой пыли объединяются в конгломераты кремнийсодержащей пыли [19, 20]. Так как экспериментальные значения критерия Колмогорова, а также критерия согласия Пирсона меньше их теоретических значений, то исследуемые выборки кремнийсодержащей пыли подчиняются логарифмически нормальному закону распределения. Сравнение результатов практических исследований с полученными ранее результатами других авторов демонстрирует их согласованность, что позволяет говорить об адекватности и достоверности полученных результатов исследований.

Исследование возможности применения усеченного логарифмически нормального закона распределения для характеристики дисперсного состава ААГС

Ученые В.В. Недин и О.Д. Нейков при проведении своих исследований установили, что представление частиц пыли, поступающей от технологических процессов, связанных с переработкой железосодержащих руд, в виде единой логарифмической прямой件 невозможно. По мнению Г.Г. Селиванова, дисперсный состав описывается кусочно-линейными функциями, т. е. в вероятностно-логарифмической системе координат это ломаная линия. О.Д. Нейков и И.Н. Логачев в своих трудах предоставляли результаты анализа дисперсного состава пыли железа, которая образуется от технологического оборудования на нескольких стадиях технологического процесса. Так, распределение представлено в виде кривых линий в вероятностно-логарифмической системе координат. Р.Х. Халилова

в своих работах подчеркивает, что дисперсный состав пыли имеет логарифмически нормальное распределение, но возможно его представление в виде кривых [21].

Зарубежные и отечественные ученые Е. Рамблер, И. Свенсон, П. Розин, Г.И. Ромашов, В.А. Минко, Е.И. Богуславский и др. описывали теоретические зависимости распределения и предложили методы построения кривой распределения частиц пыли по диаметрам. В работах В.Н. Азарова, Е.Ю. Тетеревой, Е.А. Калужиной, М.Е. Горбуновой, Н.С. Жуковой и др. было показано, что пыль, поступающая в атмосферу в результате деятельности производств строительной отрасли, подчиняется усеченному логарифмически нормальному распределению [21].

На рис. 3 представлены интегральные функции распределения объема частиц ААГС по эквивалентным диаметрам в часы пиковой нагрузки: функции усеченного логарифмически нормального распределения объема частиц в виде кривых 2–4 и функция логарифмически нормального распределения объема частиц в виде прямой (касательной) линии 1. Интегральная функция 1 демонстрирует, что до размера частиц 15 мкм распределение дисперсного состава твердых частиц подчиняется логарифмически нормальному закону и выражению (2). При размере твердых частиц более 15 мкм распределение их дисперсного состава подчиняется усеченному логарифмически нормальному закону.

Представленные выше результаты подтверждаются многолетними исследованиями авторов. Рассмотрим интегральные функции распределения объема частиц по эквивалентным диаметрам для пыли, отобранной с вертикальных поверхностей, расположенных в урбанизированной и неурбанизированной средах за осенний период наблюдения с 2015 по 2018 г. (рис. 4). Данные о диапазоне изменения размеров частиц содержатся в табл. 1.

Интегральные кривые на рис. 3 (кривые 2–4) и 4 могут быть описаны кусочным логарифмически нормальным распределением. В ранее проведенных исследованиях рассмотрены различные методы характеристики интегральных функций распределения. Если сравнить методы характеристики функции распределения объема частиц по эквивалентным диаметрам, то можно сделать вывод, что наиболее точно кривые могут быть описаны трехзвенным сплайном (линейная функция, парабола, гипербола). В результате такой аппроксимации сумма квадратов отклонений будет меньше, чем при использовании двухзвенного сплайна (линейная функция, гипербола) [22–24]. В целом данные интегральные кривые имеют вид усеченного логарифмически нормального распределения: верхняя граница диапазона изменения случайной функции составляет 40 мкм, нижняя граница диапазона изменения случайной функции составляет 70 мкм.

Усеченное логарифмически нормальное распределение образовано из классического логариф-

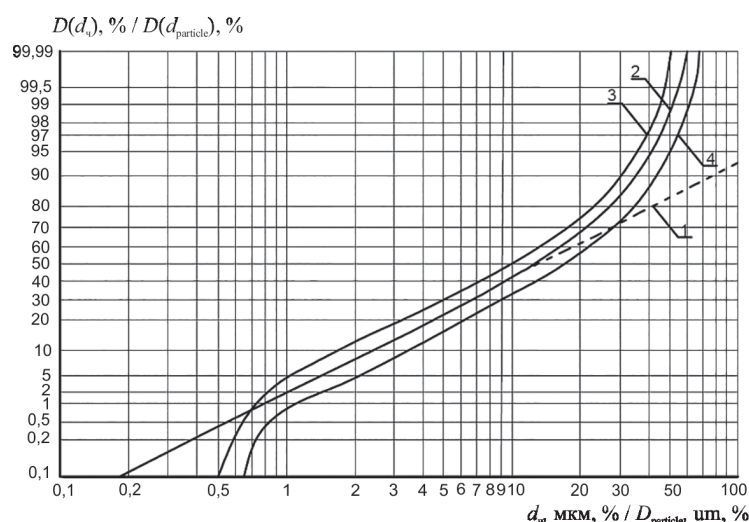


Рис. 3. Интегральные функции распределения объема частиц городской пыли по эквивалентным диаметрам в вероятностно-логарифмической системе координат в часы пиковой нагрузки: 1 — функция логарифмически нормального распределения в виде прямой (касательной) линии; 2–4 — функции усеченного логарифмически нормального распределения частиц в виде кривых; 3 — верхняя граница диапазона изменения случайной функции; 4 — нижняя граница диапазона изменения случайной функции

Fig. 3. Integral distribution functions describing urban dust particle size over equivalent diameters in the probabilistic – logarithmic coordinate system during peak hours: 1 — log normal distribution function in the form of a straight (tangent) line; 2–4 — truncated log normal distribution functions of particles in the form of curves; 3 — upper limit of the random function range; 4 — lower limit of the random function range

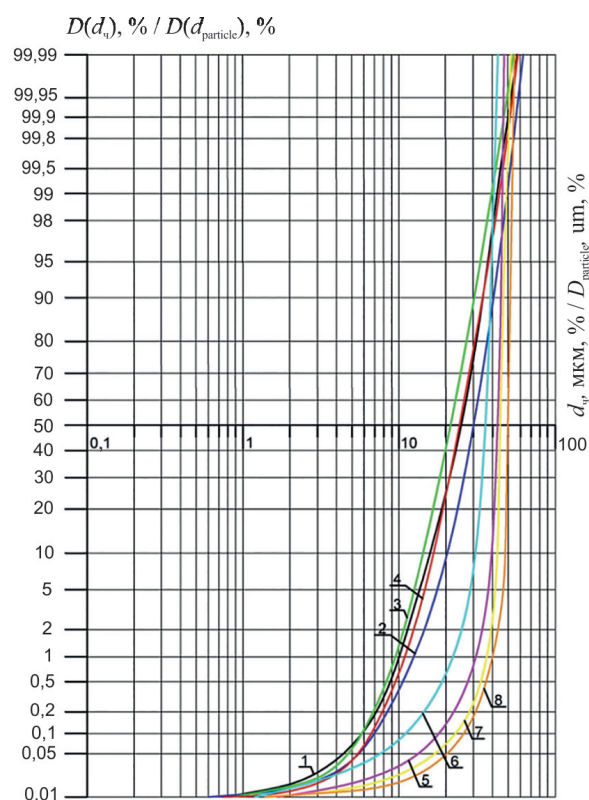


Рис. 4. Интегральные функции распределения объема частиц пыли по эквивалентным диаметрам за осенний период в урбанизированной среде: 1 — 2015 г.; 2 — 2016 г.; 3 — 2017 г.; 4 — 2018 г.; в неурбанизированной среде: 5 — 2015 г.; 6 — 2016 г.; 7 — 2017 г.; 8 — 2018 г.

Fig. 4. Integral distribution functions describing dust particle size distribution over equivalent diameters in an urban environment in autumn: 1 — 2015; 2 — 2016; 3 — 2017; 4 — 2018; in a non-urban environment: 5 — 2015; 6 — 2016; 7 — 2017; 8 — 2018

Табл. 1. Размеры частиц пыли, отобранной с вертикальных поверхностей зданий и сооружений, расположенных в урбанизированной и неурбанизированной средах круглый год с 2015 по 2018 г.

Table 1. The sizes of dust particles sampled from vertical surfaces of buildings and structures located in urban and non-urban environments in winter, spring, summer and autumn observation periods in 2015–2018

Сезон / Season	Площадка наблюдений / Observation environment		Размеры частиц за периоды наблюдений, мкм / Particle size in observation periods, μm			
			2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.
Зима / Winter	Урбанизированная среда / Urban environment	мин. / min.	0,65	0,70	0,85	0,73
		макс. / max.	65	70	58	63
	Неурбанизированная среда / Non-urban environment	мин. / min.	2,5	2,4	2,3	2,6
		макс. / max.	51	55	50	45
Весна / Spring	Урбанизированная среда / Urban environment	мин. / min.	0,75	0,80	0,68	0,73
		макс. / max.	44	58	45	53
	Неурбанизированная среда / Non-urban environment	мин. / min.	1,73	1,68	1,70	1,75
		макс. / max.	48	45	53	44
Лето / Summer	Урбанизированная среда / Urban environment	мин. / min.	0,50	0,56	0,45	0,50
		макс. / max.	65	81	73	67
	Неурбанизированная среда / Non-urban environment	мин. / min.	0,65	0,63	0,72	0,80
		макс. / max.	53	62	60	55
Осень / Autumn	Урбанизированная среда / Urban environment	мин. / min.	0,80	0,60	0,85	0,75
		макс. / max.	57	62	55	58
	Неурбанизированная среда / Non-urban environment	мин. / min.	1,77	1,25	1,53	1,48
		макс. / max.	48	43	52	55

мически нормального распределения, ограничивая интервал значений случайной величины — диаметра частиц, мкм. В общем случае усечение может быть: левым — $(0; +\infty)$, двусторонним — $(\delta_1; \delta_2)$. Плотность распределения усеченного логарифмически нормального закона имеет вид [25]:

$$\tilde{f}(x) = \begin{cases} C \cdot f(x), & x \in [\delta_{\min}; \delta_{\max}]; \\ 0, & x \notin [\delta_{\min}; \delta_{\max}], \end{cases} \quad (3)$$

где $f(x)$ — плотность распределения логарифмически нормального распределения; C — нормирующий множитель, определяемый из условия, что площадь под кривой равна 1.

Дисперсный состав ААГС как случайная функция

Проведены исследования дорожной пыли, которая является неотъемлемой частью ААГС. Ее состав формируется из выхлопных газов, износа колес и тормозных колодок автомобилей, износа проезжей части и т.д. [26–29]. На рис. 5, а представлены интегральные функции распределения объема частиц по эквивалентным диаметрам для пыли, отобранной в воздухе урбанизированной среды вблизи автомобильных дорог в Центральном районе г. Волгограда с 19 до 22 часов. На рис. 5, б приведена гистограмма и теоретическая кривая распределения максимальной суточной концентрации частиц PM10, также отобранных в воздухе городской среды вблизи автомобильных дорог в Центральном районе г. Волгограда с 19 до 22 ч. Анализ выборочных данных и гистограммы распределения показал, что значения максимальных суточных концентраций частиц

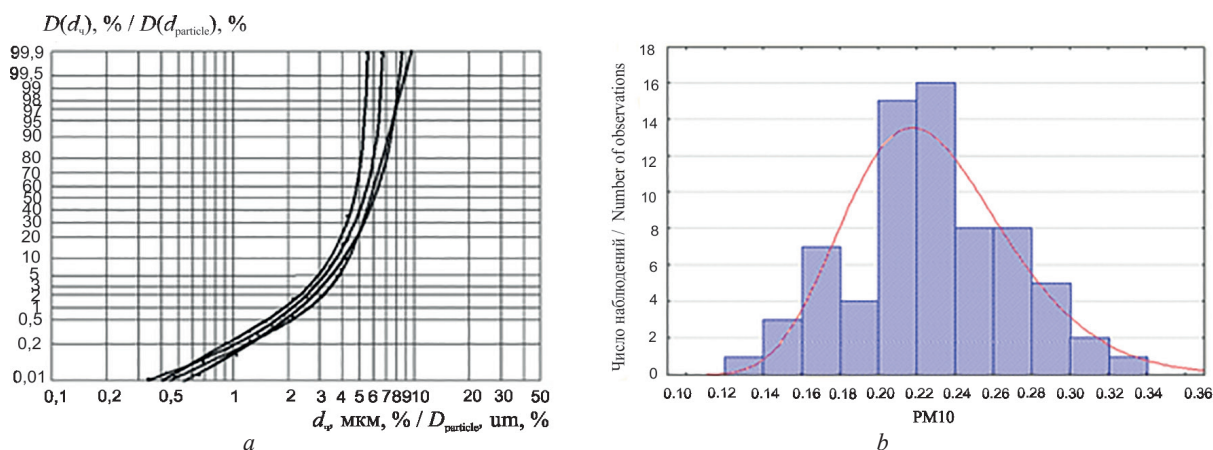
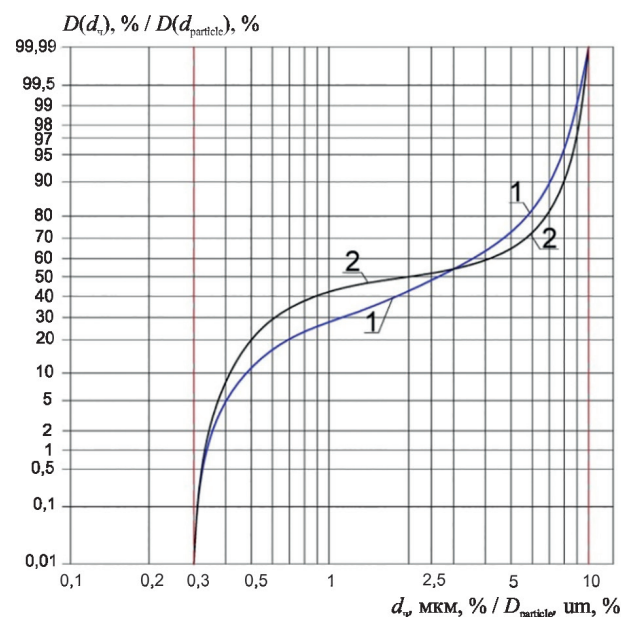


Рис. 5. Исследование пыли в воздухе урбанизированной среды вблизи автомобильных дорог в Центральном районе г. Волгограда: *a* — интегральные функции распределения объема частиц пыли по эквивалентным диаметрам; *b* — гистограмма и теоретическая кривая распределения максимальной суточной концентрации пыли PM10

Fig. 5. The study of dust in the air of an urban environment near motor roads in the Tsentralny district of Volgograd: *a* — integral functions describing dust particle size distribution over equivalent diameters; *b* — column chart and theoretical curve describing the distribution of maximal daily dust concentration DM10

PM10 в воздушной среде вблизи автомобильных дорог согласуются с логарифмически нормальным законом распределения.

Кривые, представленные на рис. 6, являются реализацией функции распределения объема частиц ААГС, которые отобраны в воздушной среде Центрального района г. Волгограда (пересечение пр-та им. В.И. Ленина и ул. Комсомольская) в две смены: утренняя смена (8:00–12:00) при температуре воздуха $T = -2,6^\circ$ и относительной влажности воздуха $W = 83\%$; вечерняя смена (17:00–21:00) при $T = -1,8^\circ$, $W = 76\%$. Кривые 1 и 2 имеют вид усеченного логарифмически нормального распределения с двусторонним усечением: слева граница усечения — 0,3 мкм, справа граница усечения — 10 мкм.



РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании многолетних исследований установлено, что дисперсный состав ААГС подчиняется усеченному логарифмически нормальному закону распределения. Дисперсный состав ААГС можно рассматривать как случайную функцию, а значения концентрации ААГС, в том числе мелкодисперсных частиц PM10 и PM2.5, — как случайные величины. Возможно получение характеристик дисперсного состава пыли в воздушной среде, а также определение дополнительных показателей, а именно среднее время пребывания фракционной концентрации выше заданного уровня, среднее число выходов фракционной концентрации в единицу времени за фиксированный уровень и др.

Рис. 6. Реализация функции распределения объема частиц по эквивалентным диаметрам для пыли, отобранной на пересечении пр-та им. В.И. Ленина и ул. Комсомольская: 1 — в утренний период наблюдений; 2 — в вечерний период наблюдений

Fig. 6. Implementation of the particle size distribution function over equivalent diameters for dust sampled at the intersection of V.I. Lenin Avenue and Komsomolskaya st.: 1 — in the morning observation period; 2 — in the evening observation period

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вопросы, связанные с изучением дисперсного состава ААГС, способствуют решению целого ряда задач, связанных с повышением экологической безопасности городской среды, охраной и укреплением здоровья населения. Это возможно за счет снижения концентрации ААГС в том числе и во внутренней воздушной среде зданий (жилые дома, школы, университеты, торговые и деловые центры и др.), так как в этих помещениях нахождение людей носит постоянный или продолжительный характер. Снижение концентрации ААГС в воздушной городской

среде обеспечивает сохранение внешнего облика зданий и сооружений, что в свою очередь способствует формированию комфортной для населения визуальной среды. С позиции визуальной экологии ухудшение внешнего вида строительных объектов негативно отражается на здоровье человека посредством его психоэмоционального восприятия увиденного. Таким образом, снижение загрязнения атмосферы городов решает проблемы здоровья и экологии человека, а также способствует сохранению объектов городской среды, демонстрирующих архитектурные и конструктивные особенности различных исторических периодов развития страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kuzmichev A.A., Azarov V.N., Kuzmichev A.V. The research of contamination regularities of historical buildings and architectural monuments by methods of computer modeling // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 129. P. 05002. DOI: 10.1051/mateconf/201712905002
2. Kuzmichev A.A., Loboyko V.F. Impact of the Polluted Air on the Appearance of Buildings and Architectural Monuments in the Area of Town Planning // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 2095–2101. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.244
3. Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution. Joint WHO/Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution. European Centre for Environment and Health Bonn Office. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2006.
4. Slesarev M.Yu., Telichenko V.I. The computer modeling concept in the paradigm of green standardization of ecological construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. P. 012126. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012126
5. Azarov V., Barikaeva N., Solovyeva T. Monitoring of Fine Particulate Air Pollution as a Factor in Urban Planning Decisions // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 2001–2007. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.279
6. Теличенко В.И., Бенуж А.А., Мочалов И.В. Формирование комфортной городской среды // Недвижимость: экономика, управление. 2017. № 1. С. 30–33. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29993249>
7. Теличенко В.И. Строительная наука в формировании среды жизнедеятельности // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 1. С. 98–100.
8. Бакаева Н.В., Чайковская Л.В., Кормина А.А. Градоустройство как комплексная деятельность по созданию социально-ориентированной городской среды // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2019. № 1 (25). С. 94–106. DOI: 10.21869/23-11-1518-2019-25-1-94-106
9. Бакаева Н.В., Бунина О.В., Натарева А.Ю., Игин А.Ю. Методика оценки состояния жилищного фонда с позиции его комфортности // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2017. № 1 (17). С. 37–46.
10. Ельчищева Т.Ф. Безопасная эксплуатация наружных ограждающих конструкций зданий при неблагоприятном воздействии среды // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 5 (128). С. 570–588. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.570-588
11. Князев Д.К. Экологическое обоснование формирования системы озеленения крупного города // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 8 (119). С. 973–983. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.8.973-983
12. Колмогоров А.Н. О логарифмическом нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении // Доклады Академии наук СССР. 1941. Т. 31. № 2. С. 99–101.
13. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. 3-е изд., перераб. Л.: Химия, 1987. 263 с.
14. Андреева И.С., Куценогий К.П. Аэрозоли Сибири / отв. ред. К.П. Куценогий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 547 с.
15. Федоров М.М. О распределении по размерам частиц пыли и дыма в воздухе индустриального города // Доклады Академии наук СССР. 1958. Т. 118. № 4. С. 691–693.
16. Донцова Т.В. Балансовый метод оценки загрязнения воздушной среды крупных городов на принципах биосферной совместимости: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2016. 24 с.
17. Буреева Н.Н. Многомерный статистический анализ с использованием ППП «STATISTICA». Нижний Новгород, 2007. 112 с.
18. Ельчищева Т.Ф., Миронова Е.Н. Оптимизация обработки экспериментальных данных экологического мониторинга // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2017. № 4 (20). С. 86–95.

19. Жукова Н.С., Остаали М., Хегай Д.С. О фракционном проскоке пыли для выбросов в атмосферу после действующих циклонов // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2016. № 1 (13). С. 68–76.

20. Богомолов А.Н., Жукова Н.С., Азаров Д.В., Хегай Д.С. Оценка пылевого фактора в воздухе рабочей зоны на предприятиях по производству мела // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. № 43 (62). С. 175–188.

21. Маринин Н.А. Исследование дисперсного состава пыли в инженерно-экологических системах и выбросах в атмосферу предприятий стройиндустрии : дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2014. 20 с.

22. Калюжина Е.А., Киреева А.И., Маринин Н.А., Гладкое Е.В., Михайловская Ю.С. Об аппроксимации интегральных функций дисперсного состава пыли в воздушной среде // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 14 (136). С. 52–56.

23. Пономарева Н.С. Совершенствование систем защиты от пыли с применением аппаратов ВЗП на строительных предприятиях по производству мела : автореф. дис. ...канд. техн. наук. Волгоград, 2011. 20 с.

24. Барикаева Н.С. Совершенствование системы мониторинга загрязнения воздуха придорожных

территорий городов мелкодисперсной пылью : дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2017. 21 с.

25. Нечаев Д.Ю., Чекмарев Ю.В. Надежность информационных систем. М. : ДМК Пресс, 2012. 62 с.

26. Барикаева Н.С. О методах снижения негативного воздействия автомобильного транспорта на качество атмосферного воздуха городской среды // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. 2017. № 8. С. 327–329.

27. Николенко Д.А., Насими М.Х., Барикаева Н.С. Сравнительный анализ загрязнения мелкодисперсной пылью атмосферы городов Волгограда и Кабула // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4 (47). С. 184.

28. Zhukova N.S., Dobrinskij D.R., Azarov A.V. Reduction of pollutant concentrations under adverse weather conditions with optical dynamic measurement systems // International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM). 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076488

29. Bakaeva N.V., Chernyaeva I.V. Criterion for estimation of ecological safety of objects of urban transport construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 262. P. 012192. DOI: 10.1088/1757-899X/262/1/012192

Поступила в редакцию 11 декабря 2019 г.

Принята в доработанном виде 16 января 2020 г.

Одобрена для публикации 27 февраля 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Валерий Николаевич Азаров — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 148320, Scopus: 7004170297, Researcher ID: N-2168-2018, ORCID: 0000-0001-7948-3049; azarovpubl@mail.ru;

Андрей Александрович Кузьмичев — кандидат технических наук, инженер кафедры безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 856738, Scopus: 57190962923, ResearcherID: H-7075-2017; ORCID: 0000-0001-9784-4928; andrew_9207@mail.ru;

Денис Александрович Николенко — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобильные дороги; **Донской государственный технический университет (ДГТУ)**; 344000, г. Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, д. 1; РИНЦ ID: 396295, Scopus: 57205862811, ResearcherID: AAG-7381-2019, ORCID: 0000-0002-7119-002X; d.a.nikolenko@mail.ru;

Анатолий Николаевич Васильев — председатель комитета транспорта и дорожного хозяйства Волгоградской области; **Комитет транспорта и дорожного хозяйства Волгоградской области**; 400120, г. Волгоград, ул. Елецкая, д. 1а, пом. 16; auto@volganet.ru;

Елена Юрьевна Козловцева — аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 847170, Scopus: 57190964949, ResearcherID: AAF-8039-2019, ORCID: 0000-0001-6881-1529; elenakozlovitseva@gmail.com.

REFERENCES

1. Kuzmichev A.A., Azarov V.N., Kuzmichev A.V. The research of contamination regularities of historical buildings and architectural monuments by methods of computer modeling. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 129:05002. DOI: 10.1051/matec-conf/201712905002
2. Kuzmichev A.A., Loboyko V.F. Impact of the Polluted Air on the Appearance of Buildings and Architectural Monuments in the Area of Town Planning. *Procedia Engineering*. 2016; 150:2095-2101. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.244
3. Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution. Joint WHO / Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution. *European Centre for Environment and Health Bonn Office*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2006.
4. Slesarev M.Yu., Telichenko V.I. The computer modeling concept in the paradigm of green standardization of ecological construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456:012126. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012126
5. Azarov V., Barikaeva N., Solovyeva T. Monitoring of Fine Particulate Air Pollution as a Factor in Urban Planning Decisions. *Procedia Engineering*. 2016; 150:2001-2007. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.279
6. Telichenko V.I., Benuzh A.A., Mochalov I.V. Shaping Comfortable Urban Environment. *Realty: economy, management*. 2017; 1:30-33. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29993249> (rus.).
7. Telichenko V.I. Construction Science in the Formation of Living Environment. *Academia. Architecture and Construction*. 2017; 1:98-100. (rus.).
8. Bakaeva N.V., Chaikovskaya L.V., Kormina A.A. The urban planning as a complex activity oriented at the foundation of socially oriented city environment. *Biosphere compatibility: people, regions, technologies*. 2019; 1(25):94-106. DOI: 10.21869/23-11-1518-2019-25-1-94-106 (rus.).
9. Bakaeva N.V., Bunina O.V., Natarova A.Yu., Igin A.Yu. Methodology of assessment of housing stock from the position of its comfort. *Biosphere compatibility: people, regions, technologies*. 2017; 1(17):37-46. (rus.).
10. Elchishcheva T.F. Safe usage of external enclosures under adverse environmental exposure. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14(5):(128): 570-588. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.5.570-588 (rus.).
11. Knyazev D.K. Ecological substantiation of formation of the large city planting system. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2018; 13(8):(119):973-983. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.8.973-983 (rus.).
12. Kolmogorov A.N. On the log-normal law of particle size distribution during crushing. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1941; 31(2):99-101. (rus.).
13. Kouzov P.A. *Fundamentals of the analysis of the dispersed composition of industrial dusts and crushed materials*. Leningrad, Chemistry, 1987; 264. (rus.).
14. Andreeva I.S., Kutsenogiy K.P. *Aerosols of Siberia*. Novosibirsk, Publishing House of the SB RAS, 2006; 548. (rus.).
15. Fedorov M.M. On the size distribution of dust and smoke particles in the air of an industrial city. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1958; 118(4):691-693. (rus.).
16. Dontsova T.V. *The balance method for assessing the air pollution of large cities on the principles of biosphere compatibility : dis ... of the Candidate of Technical Science*. Volgograd, 2016; 24. (rus.).
17. Bureeva N.N. Multivariate statistical analysis using PPP STATISTICA. Nizhny Novgorod, 2007; 112. (rus.).
18. Elchishcheva T.F., Mironova E.N. Optimization of the processing of experimental data of ecological monitoring. *Biosphere compatibility: people, regions, technologies*. 2017; 4(20):86-95. (rus.).
19. Zhukova N.S., Ostaali M., Khegay D.S. About fractional breakthrough dust for emissions to atmosphere after a cyclone. *Biosphere compatibility: people, regions, technologies*. 2016; 1(13):68-76. (rus.).
20. Bogomolov A.N., Zhukova N.S., Azarov D.V., Khegai D.S. Assessment of dust factor in air of the working zone at the enterprises of chalk production. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2016; 43(62):175-188. (rus.).
21. Marinin N.A. *Study of the dispersed composition of dust in environmental engineering systems and atmospheric emissions of construction industry enterprises : dis. ... of the Candidate of Technical Science*. Volgograd, 2014; 20. (rus.).
22. Kalyuzhina E.A., Kireyeva A.I., Marinin N.A., Gladkov E.V., Mikhailovskaya Yu.S. About approximation of integrated functions of disperse structure of a dust in the air environment. *Alternative Energy and Ecology*. 2013; 14(136):52-56. (rus.).
23. Ponomareva N.S. *Improving the dust protection system with the use of CDW devices at construction enterprises producing chalk : thesis of dis. ... of the Candidate of Technical Science*. Volgograd, 2011; 20. (rus.).
24. Barikaeva N.S. *Improving the monitoring system for air pollution of roadside territories of cities with fine dust : dis. ... of the Candidate of Technical Science*. Volgograd, 2017; 159. (rus.).
25. Nechaev D.Yu., Chekmarev Yu.V. *Reliability of information systems*. Moscow, DMK Press, 2012; 62. (rus.).
26. Barikaeva N.S. About methods to reduce the negative impact of road transport on the atmospheric

air quality of the urban environment. *Resource-energy-efficient technologies in the construction complex of the region*. 2017; 8:327-329. (rus.).

27. Nikolenko D.A., Nasimi M.H., Barikaeva N.S. A comparative analysis of fine dust pollution in the atmosphere of the cities of Volgograd and Kabul. *Engineering Journal of Don*. 2017; 4(47):184. (rus.).

28. Zhukova N.S., Dobrinskij D.R., Azarov A.V. Reduction of pollutant concentrations under adverse

weather conditions with optical dynamic measurement systems. *International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM)*. 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076488

29. Bakaeva N.V., Chernyaeva I.V. Criterion for estimation of ecological safety of objects of urban transport construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017; 262: 012192. DOI: 10.1088/1757-899X/262/1/012192

Received December 11, 2019.

Adopted in a revised form on January 16, 2020.

Approved for publication February 27, 2020.

B I O N O T E S : **Valeriy N. Azarov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Life Safety in Civil Engineering and Municipal Economy; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RISC: 148320, Scopus: 7004170297, ResearcherID: N-2168-2018, ORCID: 0000-0001-7948-3049; azarovpubl@mail.ru;

Andrey A. Kuzmichev — Candidate of Technical Sciences, Engineer of the Department of Life Safety in Civil Engineering and Municipal Economy; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RISC: 856738, Scopus: 57190962923, ResearcherID: H-7075-2017; ORCID: 0000-0001-9784-4928; andrew_9207@mail.ru;

Denis A. Nikolenko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Highways; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation; ID RISC: 396295, Scopus: 57205862811, ResearcherID: AAG-7381-2019, ORCID: 0000-0002-7119-002X; d.a.nikolenko@mail.ru;

Anatoliy N. Vasilev — Chairman; **Committee of Transport and Road Facilities of the Volgograd Region**; 1a Eletskaia st., Volgograd, 400120, Russian Federation; auto@volganet.ru;

Elena Yu. Kozlovitseva — graduate student at the Department of Life Safety in Civil Engineering and Municipal Economy; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RISC: 847170, Scopus: 57190964949, ResearcherID: AAF-8039-2019, ORCID: 0000-0001-6881-1529; elenakozlovitseva@gmail.com.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК [51-7]:[658.51]:[69.055]

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.443-451

Математическая постановка задачи моделирования поточной организации работ в строительстве

В.В. Сокольников

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Повышение эффективности исследований в области организации строительства требует разработки детерминированной модели поточной организации работ. Цель исследования — математическая постановка задачи моделирования поточной организации строительных работ. Объект исследования — параметры детерминированной математической модели поточной организации работ, выполняемых в заданный промежуток времени (смену) в выделенной части строительного объема сооружения.

Материалы и методы. Гипотеза предлагаемого метода моделирования процесса возведения здания заключается в том, что изменение (приращение) строительной готовности сооружения (изменение в направлении «вверх» массы, формы и положения смонтированных конструкций) может быть выражено, согласно представлениям математической физики, через скорость движения масс материальных объектов (строительного потока), возникающую вследствие приложения к ним сил (технологического потока), действующих в течение некоторого промежутка времени, в совокупности образующих физическую среду «поток перетекания во времени и пространстве» масс материалов из начального (складированного) положения в готовую строительную продукцию в проектных отметках. Массы элементов, их распределение в пространстве, масса сооружения по частям и в целом (сбор нагрузок) определяется на этапе проектирования, в том числе и по данным BIM-моделей.

Результаты. Предложена математическая постановка задачи моделирования поточной организации выполнения комплексов технологических процессов на частном фронте сооружения. Задача теоретического моделирования поточной организации сведена к задаче нахождения величины векторного потенциала поля распределения сил технологического потока при начальных и граничных условиях, отражающих различные технологии строительства и объемно-планировочные и конструктивные решения сооружения.

Выводы. Практический результат работы для дальнейших исследований — полученная физическая размерность основной переменной модели поточной организации работ — векторного потенциала технологического потока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: моделирование, технологический поток, поточная организация работ на стройплощадке, частный фронт, комплекс технологических процессов, частный фронт возводимого сооружения, математическое моделирование строительного и технологического потока, изменение строительной готовности сооружения, векторный потенциал технологического потока, уравнение векторного потенциала технологического потока

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сокольников В.В. Математическая постановка задачи моделирования поточной организации работ в строительстве // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 3. С. 443–451. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.443-451

Mathematical formulation of the problem of modeling the flow organization of works in construction

Vladimir V. Sokolnikov

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

ABSTRACT

Introduction. Improving the efficiency of research in the field of organisation of construction requires the development of a deterministic model of the flow organization of work. Development of the specified model will allow to improve methods of development of POC and PPR providing organizational and technological reliability of construction both at the stage of project preparation, and in the main period of construction. The purpose of this article is a mathematical formulation of the problem of modeling the flow organization of construction works. The object of the study is the parameters of a deterministic mathematical model of the flow organization of works performed in a given period of time (day) in the allocated part of the construction volume of the structure.

Materials and methods. The hypothesis of the proposed method of modeling the process of building construction is that the change (increment) of the construction readiness of the structure (change in the “up” direction of mass, shape and position of

the assembled structures) can be expressed, according to the representations of mathematical physics, through the speed of movement of the masses of material objects (construction flow) arising as a result of the application of forces (technological flow) acting for a certain period of time, in the aggregate, forming a physical environment "flow of flow in time and space" masses of materials from the initial (stored) position in the finished construction products in the design marks. The mass of elements, their distribution in space, the mass of the structure in parts and in General (collection of loads) is determined at the design stage, including according to BIM models. Analysis from this standpoint the equations of the mechanics of fields of force distribution applied to the problem of the study organization of the "flow" of work on the private front will assess the prospects for the proposed hypotheses for the construction of approximate deterministic models of organization of construction, based on concepts of physics.

Results. Mathematical model of production organization of construction works on the basis of physical representations of technological processes as a "stream flowing through time and space" of the masses of the materials from the initial (stored) position in finished building products in the project level under the influence of applied forces explicitly establishes the dependence of the change in the value of construction completion of construction parameters of the process flow. To obtain numerical values of boundary conditions for the construction readiness function, the development of algorithms for processing BIM data arrays will be required. To determine the initial conditions of the parameters of the technological flow vector that satisfy the dimension obtained in the article, it will be necessary to develop special algorithms and their software.

Conclusions. Using the proposed physical model of flow of organization work (model building flow) in the perspective automated systems of designing of construction will allow in the period of the CMP to analyze their progress based on a variant of the estimated forecasts of changes in construction readiness of the facility for the monitoring period of time and under different set parameters of the vector — potential of the process flow, which in turn, ensures organizational — technological reliability of construction by technical means of timely and reliable operational management.

KEYWORDS: flowing organization of works at the construction site, complex of simultaneous technological processes, private front-to-build structures, mathematical modeling of construction and technological stream, change of construction readiness of the facility, vector potential of technological flow, the equation of the vector potential of the process flow

FOR CITATION: Sokolnikov V.V. Mathematical formulation of the problem of modeling the flow organization of works in construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(3):443-451. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.443-451 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Повышение организационно-технологической надежности (ОТН) строительства, кроме факторов, рассмотренных в трудах [1, 2], обусловлено совершенствованием теоретических моделей организации работ, наиболее точно отражающих методы организации выполнения технологических процессов (ТП) на захватках и частных фронтах сооружений и используемых в методиках разработки проектов организации строительства (ПОС) и проектов производства работ (ППР). Исследования организации строительных работ [3, 4], организации строительного производства [5, 6] возможны на соответствующих теоретических моделях. Как известно, «вид и структура моделей во многом зависят от целей моделирования». Отечественная строительная наука разрабатывает теоретические модели с позиций совершенствования строительных технологий [7], организационных методов их применения [8, 9] и управления ими [10, 11], а также различных аспектов повышения ОТН строительства [12–14]. Анализ зарубежных публикаций показывает, что исследования как организации, так и технологии строительства ведутся там главным образом с позиций управления (менеджмента) строительными

проектами [15, 16] и получения максимальной экономической эффективности. Указанные исследования проводятся на основе аналитической обработки практических результатов выполнения строительных проектов [17, 18] методами построения различных моделей с целью повышения точности планирования [19], совершенствования методов управления работами [20], а также методик оценки рисков несвоевременного выполнения работ [21], что отражает, если можно так выразиться, «учетно-бухгалтерскую» сторону подхода к проблеме организации и управления строительством. Отдельно следует выделить исследования возможностей BIM-моделирования для задач управления [22]. Результаты как наших, так и зарубежных исследований основаны в значительной степени на нестрогих эмпирических допущениях или заимствованиях из других областей науки.

В настоящее время в нашей стране исследования в области организации строительства, его ОТН ведутся по различным направлениям, включая и менеджмент, и, соответственно, на различных теоретических моделях. Направление технико-экономического анализа отдельных функций управления строительством, материальными и трудовыми ресурсами, затратами: планирование, прогнози-

рование, учет, контроль. Системо-техническое направление, исследующее возможности организации строительных систем с целью автоматизации организационно-технологического проектирования строительства [23, 24]. Направление оптимизации проектирования организации строительства и организационно-технологических решений [25]. Значительное место в исследованиях занимает направление моделирования организации [3, 4], календарного планирования [26] и выполнения отдельных технологических процессов [7]. Случаев рассмотрения авторами вопросов обоснования и построения теоретических моделей поточной организации выполнения комплексов строительных ТП, расчетные параметры которых можно было бы использовать при разработке ПОС и ППР¹, автором настоящей статьи не выявлено. Если говорить о математическом моделировании организации строительных работ, ОТН строительства, то в настоящее время под последним понимают использование стохастических моделей с различными распределениями вероятностей обеспечения сроков строительства в целом, а также разработку и программирование алгоритмов решения широкого спектра оптимизационных задач: от оптимизации объемов земляных работ до оптимизации трудовых ресурсов при календарном планировании. Как показано в работе [27], уязвимыми местами существующих методик календарного планирования оптимизационного подхода к организации строительства являются как слабая корреляция расчетных методов с объемно-планировочными проектными решениями сооружений, так и субъективность выборок расчетных параметров из во многом устаревших ведомственных и общих нормативов Единых норм и расценок (ЕНиР) на виды работ в строительстве-86, а также типовых карт трудовых процессов советского периода. Кроме этого, существенное негативное влияние на достоверность разрабатываемой организационно-технологической документации на возведение объекта оказывает неполнота рабочей документации на момент разработки ПОС. В настоящее время решение задач поточной организации работ — формирование комплексов технологических монтажно-укладочных процессов, численного состава рабочих и механизмов, определения размеров частных фронтов, расчетов продолжительности и сменности выполнения комплекса на фронте — не имеет достаточно обоснованных научных критериев и методов, учитывающих отличия объемно-планировочных и конструктивных решений, допустимую вариативность составов исполнителей, и выполняется в большинстве случаев на основе экспертных суж-

дений, эмпирического подбора данных и их несистематизированной численной обработки.

Актуальность исследований. Из сказанного выше следует, что повышение эффективности исследований в области организации строительства требует разработки детерминированной модели поточной организации работ при выполнении комплексов ТП с целью совершенствования методик разработки ПОС и ППР, обеспечивающих ОТН строительства как на этапе проектной подготовки, так и в основной период строительства.

Цель исследования — математическая постановка задачи моделирования поточной организации строительных работ при выполнении комплексов ТП на частном фронте (захватке) возводимого сооружения.

Объект исследований — вид и параметры детерминированной математической модели поточной организации работ, выполняемых в заданный промежуток времени (смену) в выделенной части строительного объема сооружения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В труде [13] была выполнена декомпозиция проблемы обеспечения ОТН на основе классификации задач организации строительства (ОС), влияющих на ОТН в различные периоды подготовки, выполнения и сдачи строительных работ. Классификация задач ОС, осуществленная на основе их группировок по периодам, исполнителям и направленности решений, позволила очертить круг теоретических моделей, разработка которых необходима для практического использования детерминированной модели ОТН, предложенной в работе [1]. Одной из задач ОС, решаемых как в период подготовки, так и в основной период строительства, является задача расчета (поддержания) значений параметров поточной организации работ при выполнении комплексов ТП на частных фронтах возводимого сооружения, иначе — организация непрерывного технологического потока на частных фронтах в течение рабочей смены. Согласно исследованию [3], группировка строительных технологических монтажно-укладочных процессов [7] в единый комплекс осуществляется с учетом следующих требований: постоянный состав исполнителей и механизмов, соблюдение технологической последовательности возведения сооружения, техническая возможность одновременного выполнения в границах фронта операций из состава выполняемых процессов, выделение ведущих (задающих продолжительность выполнения всего комплекса) и сопутствующих (выполняемых в тот же период на том же фронте) работ, расчетное количество рабочих комплексной бригады, сведен-

¹ СП 48.13330.2011. Организация строительства. Актуализированная редакция СНиП 12-01-2004.

ных в звенья нормативного состава по ЕНиР-86. При этом организация выполнения транспортных, подготовительных и заготовительных технологических строительных процессов при календарном планировании поточной организации работ в настоящее время авторами не рассматривается.

Моделирование организации работ при выполнении ТП заключается в поиске рациональных соотношений между такими параметрами организации работ, как размеры фронта (захватки) [28], число одновременно выполняемых на фронте (захватке) рабочих операций из состава комплекса ТП (иначе — рабочих мест), в том числе подготовительных и заготовительных, численность рабочих в бригадах, объемы выполняемых работ, в том числе подготовительных и заготовительных, продолжительность и сменность выполнения работ, включенных в комплекс ТП, технологические требования, ограничения, накладываемые проектными объемно-планировочными и конструктивными решениями сооружений. Фактор поточности выполнения работ, отражающий не только непрерывность, но и количество выполняемых рабочих операций на единицу измерения площади фронта в установленный промежуток времени, накладывает некоторые ограничения на вид зависимостей между указанными выше параметрами организации работ. Выполнение работ с физической точки зрения — это приложение усилий, вызывающих перемещение (*параллельный перенос, поворот*) материалов, конструкций, узлов и деталей креплений, технологической оснастки, средств подмащивания при подаче, выверке, временном раскреплении, укладке и т.п., безотносительно; монтажно-укладочный — это процесс подготовительный, заготовительный или транспортный, а также расходование времени как на эти перемещения, так и на выполнение разметки и контрольных операций. Как известно, раздел механики «Динамика» изучает и движение материальных объектов, и силы, вызвавшие это движение. В работе [27] дано математическое представление свойств «поточности» выполнения работ как свойств механической системы, основанной на принципе формирования поля сил, вызывающих перемещение (де)монтируемых элементов в проектное положение и действующих на них в течение заданного промежутка времени (рабочей смены), что, в свою очередь, вызывает приращение строительной готовности сооружения. Распределение указанных сил ограничено в пространстве как архитектурными решениями распределения масс конструкций, запроектированных на рассматриваемом фронте сооружения, так и требованиями строительных технологий и безопасности. Указанное представление «поточности» вполне отвечает физической природе строительного процесса

и принципиально позволяет использовать методы математического моделирования динамики механических систем применительно к задачам организации работ в строительстве.

В настоящей статье выполнены анализ уравнений поля механических сил математической физики, представление указанного поля его векторным потенциалом с целью научного обоснования понятий «строительный поток», «технологический поток», «векторный потенциал технологического потока» и их пригодности для моделирования в равной степени как поточной организации работ, так и изменений строительной готовности сооружения за контрольный промежуток времени.

В труде [27] динамика возведения сооружений была рассмотрена с позиций математической модели поля вектора *скорости* V строительного потока материальных объектов через площадь частного фронта (захватки) возводимого сооружения. Поле вектора V описывается уравнениями (1) и (2) [29]:

$$\operatorname{div} V = 4\pi\rho_k; \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} V - \frac{\partial \mu}{\partial t} = 4\pi F, \quad (2)$$

где V — вектор скорости строительного потока; $\rho_k(x, y, z)$ — конструктивная плотность сооружения на частном фронте (захватке) — скалярная величина, $\rho_k = f(x, y, z)$ является функцией координат x, y, z ; измеритель

$$\rho_k = \rho_m \left(\frac{S_k}{S_f} \right) \left[\frac{\text{кг}}{\text{измеритель площади фронта (м}^2\text{)}} \right],$$

ρ_m — единица измерения удельного веса материала конструкции; S_k — площадь максимальной проекции конструкции или развернутой поверхности (де)монтируемого покрытия на фронте (захватке); S_f — площадь частного фронта выполнения технологического процесса; F — вектор (силы) технологического потока.

В пространстве частного фронта, где нет масс смонтированных конструкций (*стоков*), т.е. где удовлетворяется условие $\operatorname{div} V = 0$, поле вектора F (силы) технологического потока может быть определено как вихрь его векторного потенциала A [29]:

$$F = \operatorname{rot} A + \operatorname{grad} \rho_k. \quad (3)$$

Рассматривая технологический поток в границах частного фронта, можно положить $\operatorname{grad} \rho_k = 0$ в выражении (3), так как $\operatorname{grad} \rho_k$ является мерой строительной готовности сооружения на момент начала выполнения комплекса технологических процессов на очередном фронте, иначе — начальным условием для выполнения работ на последующем частном фронте, и, следовательно, не влияет на выполнение актуальных технологических процессов.

Векторный потенциал есть плотность технологического потока на площади частного фронта. Физический смысл векторного потенциала A поля сил F технологического потока, согласно представлениям динамики, суть распределение сил в точках пространства частного фронта с (де)монтируемыми элементами массой m , действующих на них в течение промежутка времени dt , например, восьми часов, при одновременном выполнении совокупности рабочих операций из составов различных технологических процессов. Указанное распределение (поле) сил и продолжительность их действия определяют, согласно формулам (3) и (4), вектор скорости строительного потока V . Если предположить, что вертикальная составляющая V_z вектора скорости строительного потока V , что то же самое — продолжительность возведения конструкций с проектным распределением их масс в объеме частного фронта сооружения — определяет в конечном счете продолжительность возведения здания в целом, то, согласно выражению (2) и работе [29], можно записать, что:

$$\operatorname{rot}_z V = \operatorname{rot}_z A = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}. \quad (4)$$

Выражение (3) показывает, что вертикальная составляющая вектора силы F технологического потока на фронте определяется горизонтальными составляющими его векторного потенциала A , вызывающими горизонтальные перемещения масс монтируемых конструкций. Это соответствует тому обстоятельству, что все перемещения конструкций при выполнении технологических операций монтажно-укладочных ТП выполняют на высоте от 0 до 1,5 м (в среднем 0,75 м) от опорной поверхности (в том числе от настилов подмостей) по всей площади фронта, т.е. практически в горизонтальной плоскости монтажного горизонта. Вертикальная же подача элементов производится либо в составе подготовительных или заготовительных ТП, либо механизированно. В последнем случае временем подачи конструкций на монтаж к месту проектного закрепления можно пренебречь по сравнению со временем, требующимся на геодезический контроль, разметку мест установки, выверку, временное закрепление, перестановку средств подмащивания и монтаж (демонтаж) оснастки.

Далее на основании формул (2) и (3) можно записать:

$$m_k V = (\rho_k(x, y, z) + \mu_0(x, y, z)) v A(x, y, z) dt, \quad (5)$$

где m_k — проектная масса смонтированных конструкций на единицу измерения частного фронта; $V(x, y)$ — вектор скорости строительного потока; v — объем частного фронта; Dt — продолжитель-

ность приложения сил при выполнении рабочих операций технологического потока.

Учитывая, что параметрами, определяющими силу технологического потока на единицу площади фронта, являются производительность рабочих и механизмов, можно записать общее выражение функции технологического потока через его векторный потенциал:

$$F\left(x, y, A(x, y, p_{\text{раб}}, p_{\text{мех}}), \frac{\partial A_y}{\partial x}, \frac{\partial A_x}{\partial y}\right) = 0, \quad (6)$$

где x, y — декартовы координаты точек объема частного фронта; $p_{\text{раб}}, p_{\text{мех}}$ — производительность рабочих и механизмов, реализующих рабочие операции комплекса технологических процессов в точках объема частного фронта и измеряемая в единицах массы укладываемых (монтируемых) материалов, конструкций, узлов и деталей крепления, технологической оснастки, средств подмащивания.

На основании выражений (3) и (4) векторный потенциал A технологического потока имеет размерность работы по выполнению рабочих операций в единицу времени на единицу площади частного фронта. Следовательно, с учетом формулы (6) размерность A запишется следующим образом:

$$\left[\frac{n_{\text{чел}} m_{\text{мех}} \text{КГ}_{(\text{констр.}+\text{осн.})} M_{\text{в}}^3 M_{\text{лн}}^2}{M_{\text{ф}}^2 (\text{чел.ч}) (\text{маш.ч})} \right], \quad (7)$$

где n — число рабочих; $m_{\text{мех}}$ — число механизмов, $\text{КГ}_{(\text{констр.}+\text{осн.})}$ — масса (де)монтируемых конструкций и оснастки; $M_{\text{в}}^3$ — строительный объем, соответствующий 1 м^2 площади фронта; $M_{\text{лн}}$ — длина траектории перемещения грузов на фронте; $M_{\text{ф}}^2$ — единица измерения площади фронта; чел.ч, маш.ч — производительности рабочих и механизмов на один измеритель (де)монтируемых конструкций и оснастки.

Общее решение уравнения (6), иначе — его общий интеграл, дает вид функции распределения масс конструкций на фронте для различных конструктивных и объемно-планировочных решений сооружения. Частное решение выражения (6), иначе — его частный интеграл, дает выражение для функции распределения сил в технологическом потоке при известной функции распределения масс конструкций на фронте. Решение уравнения (6), «не содержащее функции, но содержащее две константы» [29]: производительности рабочих и производительности механизмов, иначе — полный интеграл уравнения (6), соответствует моделированию состава рабочих и механизмов при задаваемых граничных условиях для фронтов с различной конфигурацией и объемно-планировочными и конструктивными решениями различных траекторий перемещения элементов строительных конструкций, а также для различных комплексов ТП.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Предложена математическая постановка исследования поточной организации выполнения комплекса технологических процессов на частном фронте возводимого сооружения. Постановка выполнена на основе представления вектора строительного потока, вертикальная составляющая которого определяет как изменение строительной готовности сооружения за контрольный промежуток времени, так и продолжительность строительства в целом. Для моделирования параметров поточной организации строительных работ применен метод описания поля технологического потока на частном фронте сооружения через его векторный потенциал. Получен вид теоретической зависимости (5) скорости возведения сооружения на частном фронте от допустимой производительности технологического потока, площади и объемно-планировочных и конструктивных параметров частного фронта.

2. Решение уравнения (6) для потенциалов различных комплексов ТП позволит моделировать значения таких параметров поточной организации, как размеры частного фронта, численный состав бригады, продолжительность работ на основе обработки математической функции объемно-планировочного распределения масс конструкций при граничных условиях размеров и конфигурации фронта, требований технологии и безопасности строительства. Поскольку в основе любого моделирования лежит подобие, а изменение строительной готовности схоже изменению величины вертикальной составляющей вектора строительного потока, планировочные решения (планы сооружения), в свою очередь, близки контурам сложной формы, массогабаритные параметры этих «планировочных контуров» (конструктивные решения) подобны распределению физических параметров трудоемкостей по длине этих контуров, решение уравнения (6) является более сложной математической задачей, чем суперпозиция решений подобных задач: статики — о величине провиса равномерно нагруженного каната, или магнетизма — о поле контуров с электрическим током, потому что распределение «конструктивных плотностей», т.е. физических параметров переменных трудоемкостей и продолжительностей, не равномерно по длине «планировочных контуров». Выявленные подобия являются отправной точкой решения более сложной задачи нахождения математического представления потенциала технологического потока на основе приближенной модели, содержащей геометрию сложных контуров с неравномерно распределенными по их длине физическими технологическими параметрами. Получение аналитического выражения математической функции

потенциала технологического потока контура сложной конфигурации весьма затруднительно, либо оно будет характеризоваться неприемлемой погрешностью расчетов. Численное решение этой задачи потребует обработки по специальным алгоритмам определения границ фронтов (конфигураций «планировочных контуров») кластеров, составленных из ВМ-массивов данных сооружений, которые задают (содержат) координаты пространственного распределения масс конструкций.

3. В общем случае каждый комплекс ТП может быть описан своей математической функцией векторного потенциала и своей функцией граничных условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимо отметить, что решение уравнения (1) позволит экономическим службам анализировать ход строительства на основе увеличения величины переменной строительной готовности сооружения за контрольный (единичный) промежуток времени. Решение уравнения (2), в свою очередь, позволит службам оперативного управления оценить текущее изменение величины потенциала технологического потока. Критерии анализа решений уравнений (1) и (2) включают текущие соотношения параметров затрат труда, финансов, плановых и фактических продолжительностей возведения отдельных частей сооружения, текущего значения величины векторного потенциала А технологического потока в текущих значениях величин строительной готовности, а также строительного потока. Совместный анализ решений (1) и (2) позволит обеспечить прогнозирование, планирование и организацию ресурсного обеспечения оставшихся работ, т.е. соблюдение плановых сроков строительства как одного из основных параметров его ОТН. Решение уравнения (6) дает возможность количественно оценить текущее значение величины ОТН строительства по ее детерминированной модели за счет сравнения расчетного и текущего значений параметра «коэффициент соответствия организационно-технологической документации — поточной организации выполнения работ (потенциалу технологического потока) в условиях конкретных объемно-планировочных и конструктивных решений сооружения». Практическая значимость исследований в области поточной организации строительных работ заключается в развитии научной базы моделирования поточной организации работ в строительстве как ведущего средства обеспечения ОТН строительства в период его проектной подготовки, а также в научном обосновании расчетных методов и использующих их методик проектирования организации строительства в составах ПОС и ППР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сокольников В.В. Моделирование организационно-технологической надежности строительства // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 4 (69). С. 92–97. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-4-92-97
2. Сокольников В.В. Совершенствование оперативного планирования строительно-монтажных работ и их ресурсного обеспечения на основе единой информационной среды управления : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2017. 23 с.
3. Сиверикова А.И., Величкин В.З. Параллельно-поточный метод организации строительства // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 4 (31). С. 135–162.
4. Бовтеев С.В. Развитие теории и практики формирования и оптимизации параллельно-поточной организации работ : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2000. 21 с.
5. Павлючук Ю.Н., Срывкина Л.Г. Критерии эффективности при принятии решений в ходе оперативного управления строительным производством // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. 2017. № 1 (103). С. 141–148.
6. Мелехин В.Б., Айгузов Т.Г., Мелехин А.В. Математические модели и методы адаптивного управления строительным производством : монография. Дагестанский государственный технический университет. М. : Парнас, 2019. 146 с.
7. Абрамов И.Л. Моделирование технологических процессов в малоэтажном строительстве : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 24 с.
8. Побегайлов О.А., Шемчук А.В. Моделирование технологических процессов при организации строительного производства // Интернет-журнал «Науковедение». 2012. № 4. С. 1–4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-tehnologicheskikh-protsessov-pri-organizatsii-stroitel'nogo-proizvodstva>
9. Солдатенко Л.В. Введение в математическое моделирование строительно-технологических задач. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2009. 161 с.
10. Антоненкова О.Е., Часова Н.А. Методы математического программирования в управлении строительством // Инновации в строительстве–2017 : мат. Междунар. науч.-практ. конф. Брянский государственный инженерно-технологический университет, Строительный институт, 2017. С. 271–278.
11. Кислов Я.А. Применение информационного моделирования в мониторинге и управлении сроками строительства объекта // Синергия наук. 2018. № 23. С. 1264–1268.
12. Болотова А.С. Формирование модели базы данных для повышения организационно-технологической надежности монолитного строительства // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 9 (108). С. 1061–1069. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.9.1061-1069
13. Сокольников В.В. Декомпозиция проблемы обеспечения организационно-технологической надежности строительства на основе классификации определений понятийного поля «организация строительства» // Вестник гражданских инженеров. 2019. №3(74). С. 87–93. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-3-87-93
14. Бурчик В.В., Кузьмич Н.П. Основные направления повышения организационно-технологической надежности строительного производства // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития : мат. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Году экологии в России : в 2-х ч. 2017. С. 132–134.
15. Sears S., Clough R., Sears G. Construction project management : hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2008.
16. Winch G.M. Managing Construction Projects. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2008.
17. Fryer B.G., Fryer M., Egbu C.O., Ellis R., Gorse C.A. The practice of construction management. Oxford, UK : Malden, Mass.: Blackwell Pub, 2004.
18. Fellows R.F., Langford D., Newcombe R., Urry S. Construction management in practice. Oxford, UK: Blackwell Science, 2002. 392 p.
19. Newitt J.S. Construction Scheduling: Principles and Practices. Pub Pearson, 2008. 384 p.
20. Oxley R., Poskitt J. Management techniques applied to the construction industry. 5th Ed. Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 1996. 324 p.
21. Batson R.G. Project risk identification methods for construction planning and execution // Construction Research Congress 2009. Seattle, Washington, United States, 2009. P. 746–755. DOI: 10.1061/41020(339)76
22. Hardin D. BIM and construction management : proven tools, methods, and workflows, Indianapolis, Ind: Wiley Technology, 2009.
23. Гинзбург А.В., Цыбульская О.М. Системы автоматизации организационно-технологического проектирования // Вестник МГСУ. 2008. № 1. С. 352–357.
24. Костюченко В.В., Кудинов Д.О. Организационно-техническое моделирование проектно-строительных систем // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3 (21). С. 731–734 URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1005>
25. Соболев В.В. Математическое моделирование и методы оптимизации в проектировании организации строительства // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. № 1 (159). С. 106–109.
26. Сандан Р.Н. Совершенствование методов календарного планирования строительно-монтаж-

ных работ на уровне простых технологических процессов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. 22 с.

27. Сокольников В.В. Моделирование организации работ на основе концепции физического строительного потока // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 1 (72). С. 94–99. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-1-94-99

28. Соболев В.В., Герасименков Р.Н., Химичев З.К. Информационное моделирование взаимосвязей между параметрами фронтов работ // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2008. № S1. С. 16–19.

29. Вебстер А., Сеге Г. Дифференциальные уравнения в частных производных математической физики. Ч. 1. М.; Л.: ОНТИ, 1934. 285 с.

Поступила в редакцию 28 августа 2019 г.

Принята в доработанном виде 27 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 27 февраля 2020 г.

О Б АВТОРЕ: **Владимир Вячеславович Сокольников** — кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительства; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4; SPIN-код: 7028-8059; vschief@yandex.ru.

REFERENCES

1. Sokolnikov V.V. Modeling of organizational and technological reliability of construction. *Bulletin of Civil Engineers*. 2018; 4(69):92-97. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-4-92-97 (rus.).

2. Sokolnikov V.V. *Improvement of operational planning of construction and installation works and their resource support on the basis of a single information management environment : autoref. dis. ... cand. techn. sciences*. SPb., 2017; 23. (rus.).

3. Siverikova A.I., Velichkin V.Z. The role of a landscape architect in reconstruction and reprofiling of abandoned quarries. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015; 4(31):135-162. (rus.).

4. Bovtееv S.V. *Development of theory and practice of formation and optimization of parallel-flow organization of works : thesis abstract of cand. tech. sc*. SPb., 2000; 21. (rus.).

5. Pavlychuk Y.N., Sryvkina L.G. Criteria of efficiency at decision-making during operational management of construction production. *Bulletin of Brest State Technical University. Construction and Architecture*. 2017; 1(103):141-148. (rus.).

6. Melekhin V.B., Aygumov T.G., Melekhin A.V. *Mathematical models and methods of adaptive management of construction operations: monograph*. Dagestan state technical University. Moscow, Parnas, 2019; 146. (rus.).

7. Abramov I.L. *Modeling of technological processes in low-rise construction : abstract. dis. ...cand. tech. sciences*. Moscow, 2007; 24. (rus.).

8. Pobegaylov O.A., Shemchuk A.V. Modeling of technological processes in the organization of construction production. *Internet Journal of Science*. 2012; 4:1-4 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie->

[tehnologicheskikh-protsessov-pri-organizatsii-stroitelno-go-proizvodstva](https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-tehnologicheskikh-protsessov-pri-organizatsii-stroitelno-go-proizvodstva) (rus.).

9. Soldatenko L.V. *Introduction to mathematical modeling of construction and technological problems*. Orenburg, GOU OGU, 2009; 161. (rus.).

10. Antonenkova O.E., Chasova N.A. Methods of mathematical programming in the management of the building. *Innovation in construction – 2017 : International Scientific-Practical Conference*. Bryansk State University of engineering and Technology, Construction Institute, 2017; 271-278. (rus.).

11. Kislov Y.A. Application of informational modeling in monitoring and managing the timing of construction. *Synergy Sciences*. 2018; 23:1264-1268. (rus.).

12. Bolotova A.S. Database model formation for improving the organizational and technological reliability of monolithic construction. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12(9):(108):1061-1069. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.9.1061-1069 (rus.).

13. Sokolnikov V.V. Decomposition of the problem of ensuring construction organizational and technological reliability on the basis of classification of the definitions of “construction organization” conceptual field. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 3(74):87-93. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-3-87-93 (rus.).

14. Burchik V.V., Kuzmich N.P. The main directions of improvement of organizational and technological reliability of construction production. *Agro-industrial complex: problems and prospects of development : Materials of the international scientific and practical conference devoted to the year of ecology in Russia. In 2 parts*. 2017; 132-134. (rus.).

15. Sears S., Clough R., Sears G. *Construction project management: hoboken*. N.J., John Wiley & Sons, 2008.
16. Winch G.M. *Managing Construction Projects*. Oxford, Blackwell Publishing Ltd, 2008.
17. Fryer B.G., Fryer M., Egbu C.O., Ellis R., Gorse C.A. *The practice of construction management*. Oxford, UK, Malden, Mass., Blackwell Publ., 2004.
18. Fellows R.F., Langford D., Newcombe R., Urry S. *Construction management in practice*. Oxford, UK, Blackwell Science, 2002; 392.
19. Newitt J.S. *Construction Scheduling: Principles and Practices*. Publ. Pearson, 2008; 384.
20. Oxley R., Poskitt J. *Management Techniques Applied to the Construction Industry*. 5th Ed. Oxford, Blackwell Publishing Ltd., 1996; 324.
21. Batson R.G. *Project Risk Identification Methods for Construction Planning and Execution*. Construction Research Congress 2009. Seattle, Washington, United States, 2009; 746-755. DOI: 10.1061/41020(339)76
22. Hardin D. *BIM and construction management : proven tools, methods, and workflows*. Indianapolis, Ind, Wiley Technology, 2009.
23. Ginzburg A.V., Tsybulskaya O.M. Automation systems of organizational and technological design. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2008; 1:352-357. (rus.).
24. Kostuchenko V.V., Kudinov D.O. Organizational and technical modeling of design and construction systems. *Engineering journal of Don*. 2012; 3(21):731-734. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/1005> (rus.).
25. Sobolev V.V. Mathematical modelling and methods of optimization in designing the organization of construction. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2011; 1(159):106-109. (rus.).
26. Sandan R.N. *Improvement of methods of calendar planning of construction and installation works at the level of simple technological processes: thesis abstract of cand. tech. sc.* SPb., 2011; 21. (rus.).
27. Sokolnikov V.V. Modeling of work organization based on the concept of physical construction stream. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019; 1(72):94-99. DOI: 10.23968/1999-5571-2019-16-1-94-99 (rus.).
28. Sobolev V.V., Gtrasimenkov R.N., Hymishhev Z.K. Information modeling relationships between the parameters of the work front. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*. 2008; S1:16-19. (rus.).
29. Webster A., Sege G. *Partial differential equations of mathematical physics*. Part 1. Moscow; Leningrad, ONTI, 1934; 285. (rus.).

Received August 28, 2019.

Adopted in a revised form on November 27, 2019.

Approved for publication February 27, 2020.

B I O N O T E S : **Vladimir V. Sokolnikov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of construction organization; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 2nd Krasnoarmeiskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation; SPIN-code: 7028-8059; vschief@yandex.ru.

Выбор технологии обеспечения эксплуатационной пригодности зданий в зоне подземного строительства

Э.И. Алирзаев¹, М.Е. Дементьева²

¹ МОСИНЖПРОЕКТ; г. Москва, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Одна из серьезных проблем при возведении подземных сооружений в условиях плотной городской застройки — возникновение сверхнормативных деформаций фундаментов эксплуатируемых зданий, попадающих в зону влияния подземного строительства. Предмет исследования — расчетное обоснование современной технологии укрепления основания методом компенсационного нагнетания. Актуальность поставленной задачи определяется тем, что выбор наиболее эффективной технологии защиты должен основываться не только на сравнении технологических осадок с предельно допустимыми значениями, но и на оценке возможности контроля и управления перемещениями фундаментов зданий и сооружений в ходе строительства и последующей эксплуатации.

Материалы и методы. На основе данных обследования эксплуатируемого здания, попадающего в зону влияния работ по откопке котлована для строительства монтажно-щитовой камеры объекта метрополитена, методом математического моделирования произведено исследование параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) его фундаментов. Задача решалась методом конечных элементов на базе программно-вычислительного комплекса (ПВК) Z_Soil v.18.24.

Результаты. Смоделировано изменение параметров НДС фундаментов при различных технологиях его усиления. Установлено, что минимальное влияние на фундаменты эксплуатируемого здания при возведении котлована получено в методе компенсационного нагнетания. Предложена система критериев для принятия решения по выбору эффективного способа обеспечения пригодности зданий в зоне подземного строительства к эксплуатации.

Выводы. Результаты работы могут быть использованы при обосновании выбора технологии предупреждения и контроля сверхнормативных деформаций фундаментов. Функция расчета объема нагнетаемого материала в ПВК Z_Soil может быть применима для определения расхода материалов и обоснования экономической эффективности технологического решения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геотехника, осадки, категория технического состояния, усиление фундаментов, Z_Soil, эксплуатация зданий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Алирзаев Э.И., Дементьева М.Е. Выбор технологии обеспечения эксплуатационной пригодности зданий в зоне подземного строительства // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 3. С. 452–461. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.452-461

Choice of technologies of ensuring exploitation suitability of buildings in the underground construction area

Emil Imran Oglu Alirzaev¹, Marina E. Dement'eva²

¹ MOSINZHPROEKT; Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. One of the serious problems in the construction of underground structures in a dense urban area is the occurrence of excess deformations of the foundations of operating buildings that fall into the zone of influence of underground construction. The subject of the study was the calculated justification of the modern technology of compensatory injection. The relevance of the task is determined by the fact that the choice of the most effective protection technology should be based not only on a comparison of technological precipitation with maximum permissible values, but also on the assessment of the possibility of monitoring and controlling the movements of the foundations of buildings and structures during construction and subsequent operation. The purpose of the study was to compare various methods of protecting the foundations of existing buildings and structures and justify the selection of the most effective of them for further implementation and dissemination in the design and construction of urban underground structures.

Materials and methods. On the basis of the survey data of the operated building falling into the impact zone of excavation of the pit for the construction of the installation and shield chamber of the subway, the parameters of the stress-strain state of its foundations are studied by mathematical modeling. The problem was solved by the finite element method based on the software and computer complex Z_Soil v.18.24.

Results. Based on the analysis of the results of the examination of the administrative building using the finite element method, a change in the parameters of the stress-strain state of the foundations was modeled with various technologies for strengthening it. In the course of solving the geotechnical problem, it was found that the minimum impact on the foundations of the building during the construction of the pit was obtained in the method of compensatory injection. The system of criteria for making a decision on choosing an effective way to ensure the suitability of buildings in the underground construction zone for operation is substantiated.

Conclusions. The results of this work can be used to justify the choice of technology for prevention and control of excess deformations of foundations. The function for calculating the volume of injected material in the Z_Soil software and computer complex can be used to justify the consumption of materials and the economic efficiency of the technological solution.

KEYWORDS: geotechnics, foundation precipitation, technical condition category, foundation strengthening, Z_Soil, exploitation of building

FOR CITATION: Alirzaev E.I.O., Dement'eva M.E. Choice of technologies of ensuring exploitation suitability of buildings in the underground construction area. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(3):452-461. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.452-461 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Широкомасштабное освоение подземного пространства за последние десятилетия связано с активным развитием сложных видов геотехнических работ. При этом появляется серьезная научная проблема обеспечения пригодности к эксплуатации зданий, попадающих в зону влияния подземного строительства. Так, возникновение дополнительных перемещений фундаментов таких зданий, превышающих предельно допустимые значения, приводит к необходимости выполнения специальных дорогостоящих и трудоемких работ, снижающих негативное влияние нового строительства [1]. Следовательно, увеличение объемов и масштабов строительства метрополитена, тоннелей коммунального и транспортного назначения, других подземных сооружений в крупных городах, высокий уровень их сложности и ответственности, а также возможные негативные последствия для природной среды и существующей застройки мегаполиса предполагают разработку комплекса специальных защитных мероприятий, реализация которых должна осуществляться не только при новом строительстве, но и при эксплуатации объектов городской инфраструктуры.

Актуальность исследования обоснована необходимостью принятия эффективного проектного решения по защите эксплуатируемых зданий и сооружений от сверхнормативных деформаций. В значительной степени выбор технологии защиты определяется степенью достоверности оценки геотехнических условий, а также результатов обследования технического состояния конструкций эксплуатируемых зданий. Для этого требуется изучить

свойства грунтов, спрогнозировать вероятность изменения состояния грунтового массива, выполнить обследование окружающей застройки. Следующим этапом является математическое моделирование изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтов. При этом последующий процесс строительства подземного сооружения должен сопровождаться постоянным контролем планово-высотных перемещений строительных конструкций окружающих его зданий для своевременной реализации мероприятий по обеспечению эксплуатационной надежности.

Исследования отечественных и зарубежных авторов в области геотехники посвящены не только совершенствованию методов возведения подземных сооружений, но и разработке технических решений по контролю и снижению негативного влияния подземного строительства на объекты городской инфраструктуры. В частности, в ряде работ рассматриваются методы мониторинга за деформациями грунтовых массивов и строительных конструкций в процессе подземного строительства [2, 3]. Внимание уделено и вопросам обеспечения безопасности при освоении подземного пространства крупных мегаполисов [4–9]. В связи с развитием компьютерных технологий значительная доля исследований посвящена вопросам применения BIM-технологий и численного моделирования при проектировании подземных сооружений [10–13].

Анализ научно-технической литературы показал [14–16], что в отечественной и зарубежной практике используют различные технологии усиления фундаментов эксплуатируемых зданий. Традиционными методами являются укрепление тела фун-

дамента устройством обойм, увеличение площади подошвы фундамента, устройство свай усиления, увеличение глубины заложения с устройством дополнительного фундамента или монолитной плиты и т.д. Их существенная особенность заключается в трудоемкости работ, а также высоких рисках их применения в условиях плотной городской застройки, связанных, например, с вероятностью вскрытия напорных вод, воздействием ударных нагрузок при производстве ремонтных работ и т.д.

Помимо рассмотренных традиционных методов, существуют современные технологические решения защиты эксплуатируемых зданий от влияния строящихся подземных сооружений путем выполнения инъекционных работ [17, 18]. К ним можно отнести методы силикатизации и цементации грунтов, закрепления грунтов материалами типа «Микродур», струйной технологии Jet, отсечной стены или устройства геотехнического экрана. Определяющим фактором при выборе того или иного метода служат инженерно-геологические условия площадки строительства и зоны ее действия на эксплуатируемые объекты городской застройки. С этой точки зрения наиболее универсальный среди рассматриваемых методов — метод отсечной стены. Вместе с тем основной его особенностью, ограничивающей применимость, является вероятность появления технологических осадков, которые могут привести к дополнительным перемещениям фундаментов зданий прилегающей застройки еще до начала проведения основных строительных работ, при этом мониторинг деформаций строительных конструкций эксплуатируемых зданий в ходе нового строительства и при дальнейшей эксплуатации зачастую не предполагается.

Рассмотренные методы постоянно совершенствуются. Появляются новые технологии, в частности, к ним можно отнести метод компенсационного нагнетания, важным преимуществом которого является возможность прогнозирования и компенсации с высокой степенью достоверности процессов развития возможных деформаций как на этапе строительства подземного сооружения, так и на стадии эксплуатации окружающей застройки [19]. За счет использования растворов высокой проникающей способности и контролируемой кинетики затвердевания, а также специфики технологии производства работ обеспечивается управляемый процесс предупреждения деформаций эксплуатируемого здания, основанный на эффекте домкрата, расположенного под всей площадью здания [20–26].

По данным Тоннельной ассоциации России, в ближайшие три года в Москве ожидается строительство не менее 50 подземных сооружений, в том числе метрополитенов, транспортно-пересадочных

узлов, автодорожных и городских тоннелей, коллекторов и т. п., где целесообразно применять данную технологию. Кроме того, при возведении и последующей эксплуатации высотных зданий, мостов, башен, градирен и других аналогичных объектов технология компенсационного нагнетания также может быть весьма востребована. При этом возможная ежегодная экономия прямых затрат, необходимых для защиты зданий и сооружений от сверхнормативных деформаций, может составить до 2 млрд руб. с одновременным сокращением сроков производства не менее чем на 15 % за счет исключения избыточных объемов работ, характерных для традиционных и альтернативных технологий. В случае необходимости устранения проявившихся осадочных деформаций технология компенсационного нагнетания является фактически безальтернативным решением, экономический эффект от применения которого соизмерим с затратами на демонтаж и новое строительство зданий и сооружений.

Результативность рассматриваемой технологии во многом зависит от правильного назначения места расположения и размеров зоны нагнетания, состава укрепляющих растворов, технологии и режима нагнетания, строго соответствующих конкретным условиям строительства, что подтверждает необходимость расчетного обоснования метода компенсационного нагнетания для обеспечения эксплуатационной пригодности зданий в зоне строительства подземного сооружения и определяет цель данной работы. Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи.

1. Разработать конечно-элементную модель и рассчитать НДС фундамента здания, попадающего в зону влияния строительства станционного комплекса при различных вариантах моделирования защитных мероприятий.
2. Выполнить сравнительный анализ полученных результатов осадок фундамента при разных методах защиты.
3. Выбрать технологию с наиболее управляемым процессом предупреждения дополнительных деформаций здания, попадающего в зону влияния нового строительства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — современные технологические решения по предотвращению сверхнормативных дополнительных деформаций фундаментов эксплуатируемых зданий, попадающих в зону влияния подземного строительства. Предмет исследования — принципы расчетного обоснования выбора эффективного технологического решения, в том числе с использованием метода конечных элементов

(МКЭ). Для решения поставленных задач была применена следующая последовательность выполнения исследования.

1. Оценка предварительной зоны влияния нового строительства на существующие здания.
2. Определение категории технического состояния зданий, попадающих в зону строительства.
3. Разработка системы критериев для принятия решения по выбору эффективной технологии защиты.
4. Определение максимально допустимых значений дополнительных перемещений с учетом технического состояния зданий.
5. Моделирование задачи в плоской постановке МКЭ на базе программно-вычислительного комплекса (ПВК) Z_Soil v.18.24 без учета проведения защитных мероприятий.
6. Анализ и сравнение полученных результатов с предельно допустимыми значениями.
7. Повторное моделирование задачи с учетом выполнения защитных мероприятий.
8. Анализ и сравнение полученных результатов с предельно допустимыми значениями.
9. Моделирование задачи в пространственной постановке для увеличения точности полученных результатов.
10. Окончательный выбор оптимального решения рассматриваемой проблемной ситуации на основе разработанной системы критериев.

Современными методами, применяемыми для обоснования инженерных решений при проектировании и строительстве сооружений, оценки взаимовлияния строящихся и существующих зданий и сооружений в условиях городской застройки, являются численные методы решения систем дифференциальных уравнений эллиптического либо гиперболического типа, описывающих уравнения равновесия. В работе рассматривается возможность применения указанных методов для получения модели НДС фундамента здания, находящегося в зоне ведения работ нового строительства. В рассматриваемом случае решается задача статики, которая описывается системой дифференциальных уравнений эллиптического типа. Для численного решения этой системы был применен МКЭ, использование которого позволяет моделировать сложные процессы взаимодействия сооружений с грунтовыми массивами. Инструментом для реализации возможностей МКЭ в конкретных приложениях является компьютерная программа Z_Soil или, в зависимости от используемой терминологии, пакет программ.

В ходе решения данной геотехнической задачи были рассмотрены следующие варианты инъекционных работ [26]:

- 1) метод отсечной стены в вертикальном исполнении (вертикальный геотехнический барьер);

- 2) метод компенсационного нагнетания в вертикальном и наклонном исполнении с параллельной разработкой котлована.

Одним из факторов, определяющих выбор эффективной технологии защиты, является управление эксплуатационной пригодностью здания, основанное на поддержании допустимой категории технического состояния [28, 29] как на этапе строительства подземного сооружения, так и в процессе последующей эксплуатации. Поэтому в работе была предложена система критериев для принятия управленческого решения по выбору эффективной технологии защиты.

1. Критерий X_1 характеризует степень влияния технологии защиты на техническое состояние объекта, расположенного в зоне строительства подземного сооружения.

2. Критерий X_2 характеризует степень управления величиной дополнительных деформаций фундамента объекта, расположенного в зоне строительства подземного сооружения.

Основываясь на анализе нормативных требований к техническому состоянию зданий и сооружений для первого критерия X_1 , предложена бинарная шкала оценивания: 0 — несоответствие нормативным требованиям; 1 — соответствие нормативным требованиям. Присвоение балла выполняется исходя из условия:

$$X_1 = \begin{cases} 0, & s^f > s^{reg} \\ 1, & s^f \leq s^{reg} \end{cases}, \quad (1)$$

где s^f — величина фактической дополнительной осадки фундамента эксплуатируемого здания, мм; s^{reg} — предельно допустимое значение дополнительной осадки фундамента эксплуатируемого здания, мм.

Для второго критерия X_2 предложена качественная шкала оценивания, разработанная на основе метода экспертной оценки, с базовой интерпретацией балльных значений: 1 — управляемый метод; 2 — частично управляемый метод; 3 — неуправляемый метод. Возможность управления процессом предупреждения деформаций оценивается на основе математического моделирования путем технической возможности увеличения объемов конечных элементов в зоне расположения инъектора при заданном объеме нагнетания раствора. Для этого выбранным конечным элементам присваивается функция нагрузки и коэффициент начальной деформации, фиксирующий их увеличение на заданный объем [1]. При этом расчетный объем нагнетания раствора может быть определен по формуле:

$$V = V_0 \left((\Delta \epsilon_{0,i} + 1)^3 - 1 \right), \quad (2)$$

где V_0 — начальный объем конечных элементов, м^3 ; $\Delta \epsilon_{0,i}$ — коэффициент начальной деформации при заданном шаге расчета.

В результате задача сводится к последовательному принятию решения: сначала по показателю X_1 , исключая заведомо недопустимые решения, затем по показателю X_2 , характеризующему возможность управления эксплуатационной пригодностью здания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на примере многоэтажного здания гражданского назначения (здание МГТС) с железобетонным каркасом, расположенного в ЮВАО г. Москвы, попадающего в зону влияния работ по возведению станционного комплекса

«Стахановская улица» (рис. 1). Выполненное обследование показало, что, согласно ГОСТ 31937-2011, здание находится в работоспособном техническом состоянии и в соответствии со СП 22.13330.2011 предельные дополнительные деформации не должны превышать 30 мм.

Для решения поставленной первой задачи, сформулированной в статье, была разработана конечно-элементная модель (рис. 2). В качестве анализируемых данных рассмотрены дополнительные вертикальные перемещения фундаментов эксплуатируемого здания в процессе разработки котлована для сооружения монтажно-щитовой камеры.

Далее в процессе моделирования построены изополя вертикальных перемещений фундамента



Рис. 1. Здание, расположенное в зоне влияния котлована для сооружения монтажно-щитовой камеры станционного комплекса «Стахановская улица»: *a* — схема расположения здания; *b* — трещина на стыке стены и перегородки раскрытием до 1 мм; *c* — трещины в цоколе раскрытием до 3 мм

Fig. 1. A building located in the area of influence of the pit for the construction of the mounting and shield chamber of the Stakhanovskaya Street station complex: *a* — layout of the building; *b* — crack at the junction of the wall and the partition opening up to 1 mm; *c* — cracks in the base opening up to 3 mm

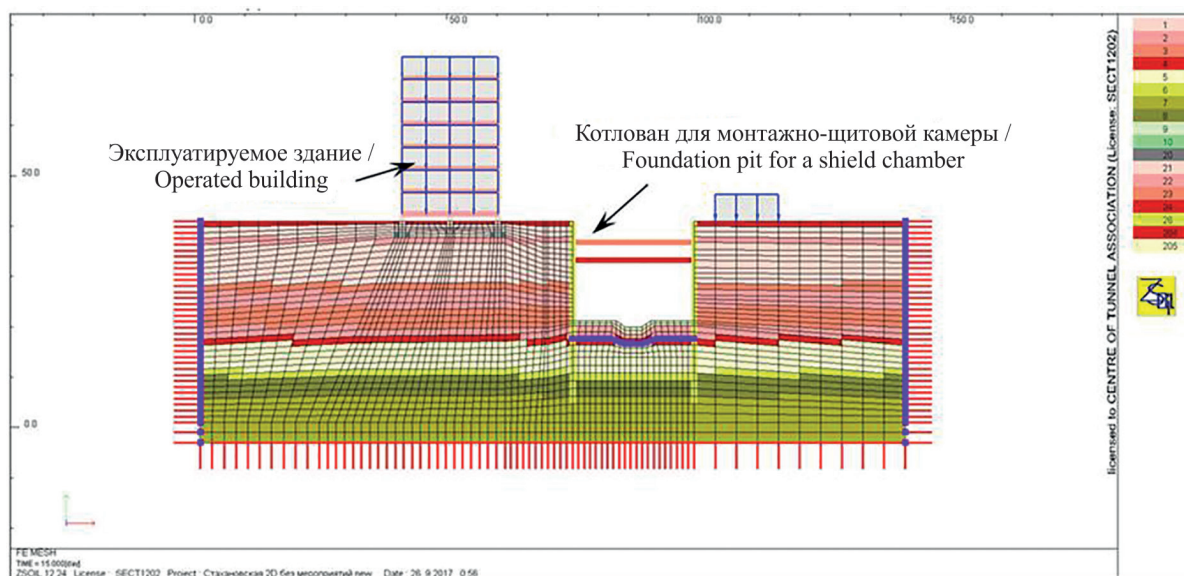


Рис. 2. Модель эксплуатируемого здания МГТС и котлована для сооружения монтажно-щитовой камеры в ПК Z_Soil

Fig. 2. The model of the operated MGTS building and the foundation pit for the construction of the mounting-shield chamber in the software package Z_Soil

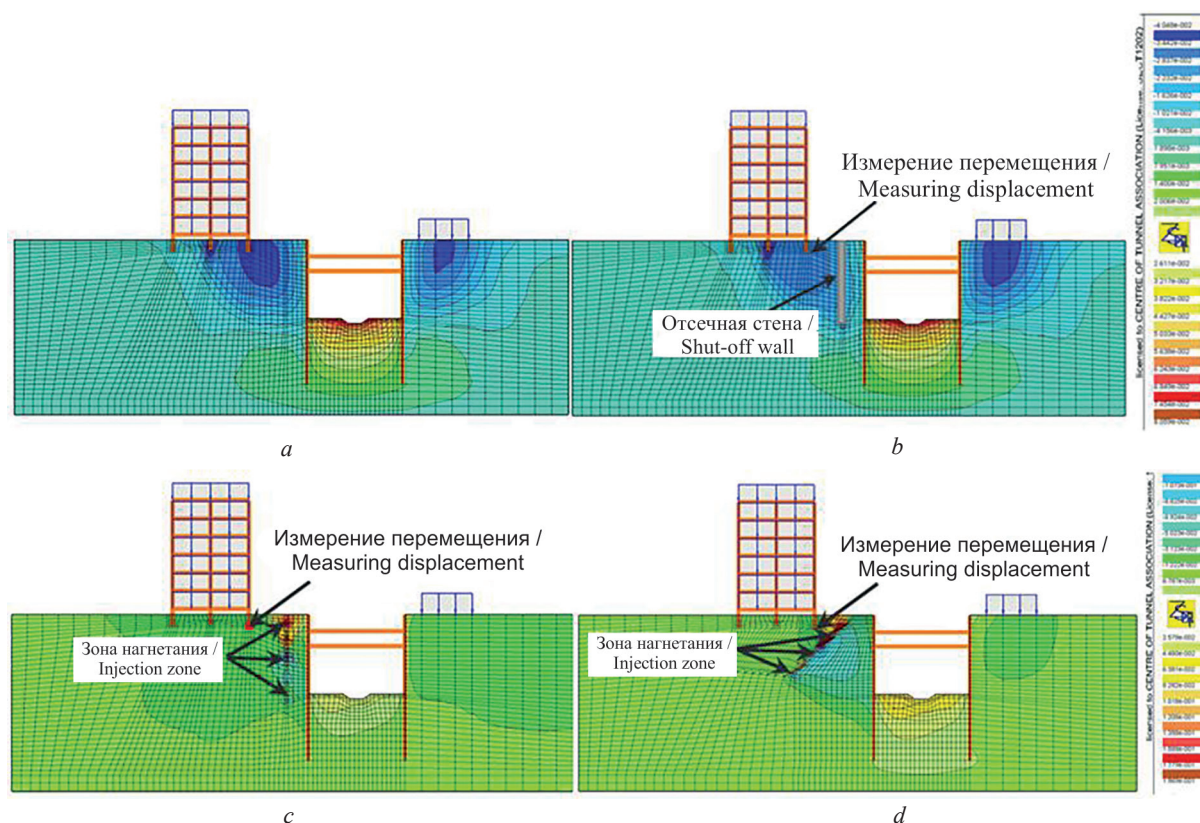


Рис. 3. Изополя вертикальных перемещений фундамента здания: *a* — без проведения мероприятий по усилению; *b* — при моделировании усиления методом отсечной стены; *c* — при моделировании усиления методом компенсационного нагнетания в вертикальном исполнении; *d* — при моделировании усиления методом компенсационного нагнетания в наклонном исполнении

Fig. 3. Isopole of vertical movements of the foundation of the building: *a* — without taking measures to strengthen; *b* — when modeling gain by the cut-off wall method; *c* — when modeling amplification by the method of compensatory injection in vertical design; *d* — when modeling gain by the method of compensatory discharge in an inclined design

рассматриваемого здания и определены его расчетные осадки (рис. 3, табл. 1).

Результатом моделирования стало решение второй задачи, поставленной в статье. На основании сравнительного анализа результатов серии предварительных расчетов в плоской постановке минимальное влияние на фундаменты здания получено при методе компенсационного нагнетания в наклонном исполнении.

Далее для увеличения точности полученных результатов было произведено моделирование задачи в пространственной постановке на момент окончания строительства монтажно-щитовой камеры (рис. 4).

Результаты расчета показали, что на момент окончания подземного строительства расчетные осадки фундамента эксплуатируемого здания составят 21,6 мм, т.е. не превысят допустимого значения на 28 %, следовательно, будет обеспечено работоспособное состояние здания.

В заключение представлены результаты ранжирования инъекционных технологий защиты на основе представленной в работе системы критериев принятия решения (табл. 2).

Табл. 1. Результаты численного моделирования значений дополнительных перемещений фундамента эксплуатируемого здания в ПВК Z_Soil

Table 1. The results of numerical simulation of the values of additional displacements of the foundation of the operated building in the software package Z_Soil

Вариант моделирования / Simulation option	Расчетные осадки s^f , мм / Settlement precipitation s^f , mm
Без мероприятий по усилению / No reinforcement measures	39,7
Метод отсечной стены / Shut-off wall method	32,3
Метод компенсационного нагнетания в вертикальном исполнении / Vertical compensatory discharge method	19,9
Метод компенсационного нагнетания в вертикальном исполнении / Vertical compensatory discharge method	15,3

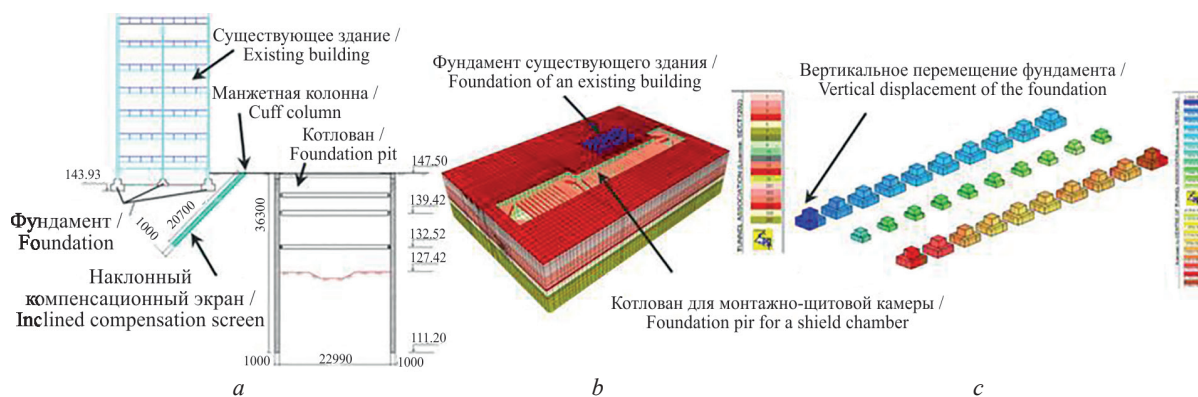


Рис. 4. Моделирование задачи в пространственной постановке: *a* — схема расположения наклонного компенсационного экрана; *b* — расчетная схема в ПК Z_Soil 3D; *c* — моделирование вертикальных перемещений столбчатых фундаментов эксплуатируемого здания

Fig. 4. Modeling the problem in a spatial setting: *a* — layout of the inclined compensation screen; *b* — design scheme in the software package Z_Soil 3D; *c* — modeling of vertical movements of columnar foundations of an operated building

Табл. 2. Экспертная оценка приоритетности при выборе технологии защиты от сверхнормативных деформаций

Table 2. Expert assessment of priority when choosing technology for protection against excess deformations

Технология усиления / Gain technology	Отклонение расчетных осадок от предельно допустимого значения, % / Deviation of calculated precipitation from the maximum permissible value, % $\frac{s^f - s^{reg}}{s^{reg}} \cdot 100 \%$	Категория технического состояния здания в зоне подземного строительства / Category of the technical condition of the building in the underground construction zone	X_1	X_2	Результат принятия решения / Decision Result
Метод отсечной стены / Shut-off wall method	+7,6	Аварийная / Emergency	0	3	Метод компенсационного нагнетания в вертикальном исполнении / Vertical compensatory discharge method
Метод компенсационного нагнетания в вертикальном исполнении / Vertical compensatory discharge method	-33,7	Работоспособная / Workable	1	1	
Метод компенсационного нагнетания в вертикальном исполнении / Vertical compensatory discharge method	-49,0	Работоспособная / Workable	1	1	
Метод компенсационного нагнетания в вертикальном исполнении при моделировании задачи в пространственной постановке / Compensatory injection method in vertical execution when modeling a task in a spatial setting	-28,0	Работоспособная / Workable	1	1	Метод компенсационного нагнетания в вертикальном исполнении / Vertical compensatory discharge method

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В проведенном исследовании выполнен анализ существующих и наиболее распространенных современных технологий, обеспечивающих безопасность зданий, попадающих в зону влияния строительства подземных сооружений. Определено, что одним из перспективных направлений развития технологий защиты зданий и сооружений при освоении подземного пространства в Москве и других

мегаполисах страны является применение компенсационного нагнетания в грунты основания.

В работе методом математического моделирования для действующего административного здания, попадающего в зону влияния работ по возведению станционного комплекса «Стахановская улица», проведено исследование НДС грунтового массива при строительных работах. Установлено, что расчетные осадки здания при устройстве отсечной стены превысили предельно допустимое зна-

чение, при методе компенсационного нагнетания в среднем составили 60 % от предельного значения.

Следовательно, полученные данные свидетельствуют о том, что технология компенсационного нагнетания за счет возможности корректировки объемов конечных элементов в зоне инъектирования является управляемой с точки зрения возможности

влияния на процесс деформации грунтового массива. При этом применение датчиков гидростатического нивелирования позволяет обеспечить постоянный режим мониторинга и тем самым гарантировать эксплуатационную пригодность действующего здания в течение всего периода строительства монтажно-щитовой камеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харченко И.Я., Зерцалов М.Г., Симутин А.Н., Харченко А.И. Расчетно-технологические основы управления напряженно-деформируемым состоянием грунта при компенсационном нагнетании // Метро и тоннели. 2015. № 5. С. 20–23.
2. Yin Z.Z. Application of hydrostatic leveling system in metro monitoring for construction deep excavation above shield tunnel // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 333–335. Pp. 1509–1513. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.333-335.1509
3. Shen X., Lu M., Mao S., Wu X. Integrated approach to machine guidance and operations monitoring in tunnel construction // The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC). 2014. P. 103–109. DOI: 10.22260/isarc2014/0014 URL: http://www.iaarc.org/publications/fulltext/isarc2014_submission_78.pdf (дата обращения 5.3.20)
4. Дремов В.И., Мазеин С.В., Прудников А.Д., Акутин Д.В. Мероприятия промышленной безопасности при проектировании строительства московского метрополитена // Метро и тоннели. 2016. № 5. С. 31–38.
5. Дементьева М.Е., Уткин Р.М. Обзор особенностей эксплуатации подземных сооружений в условиях Крайнего Севера // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сб. мат. Междунар. науч. конф. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2017. С. 814–817.
6. Гарбер В.А. Нештатные ситуации при строительстве и эксплуатации Московского метрополитена за последние 40 лет // Метро и тоннели. 2014. № 3. С. 34–35.
7. Корнилов М.В., Половов Б.Д., Кряжевских А.Н., Кузьмин Н.Г. Объемно-планировочные и конструктивно-технологические решения по строительству и эксплуатации линий Екатеринбургского и Челябинского метрополитенов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2014. № 6. С. 70–78.
8. Алтатов С.Н. Развитие метрополитена открывает перспективы комплексного освоения подземного пространства // Метро и тоннели. 2014. № 4. С. 16–17.
9. Дементьева М.Е., Минин К.Е. Анализ эксплуатационной пригодности плиты покрытия блока станции метрополитена // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 7. С. 42–52. DOI: 10.12737/article_5b4f02b82615c0.05783178
10. Daller J., Zibert M., Exinger C., Lah M. Implementation of BIM in the tunnel design — Engineering consultant's aspect // Geomechanics and Tunneling. 2016. Vol. 9. Issue 6. Pp. 674–683. DOI: 10.1002/geot.201600054
11. Schweiger H.F., Falk E. Reduction of settlements by compensation grouting Numerical studies and experience from Lisbon underground // Tunnels and Metropolises. Balkema, Rotterdam, 1998. P. 1047–1052.
12. Knitsch H. Visualization of relevant data for compensation grouting // Tunnel. 2008. No. 3. P. 38–45.
13. Марева О.В., Кловский А.В. Оценка эффективности способов усиления железобетонных колонн при реконструкции // Природообустройство. 2017. № 2. С. 33–41.
14. Полищук А.И., Петухов А.А. Способы усиления фундаментов и строительных конструкций цокольной части реконструируемых, восстанавливаемых зданий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2018. Т. 9. № 1. С. 42–51. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.04
15. Gruzin A.V., Gruzin V.V. Method of the cast-in-place friction pile well walls local soil compaction // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1050. P. 012031. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012031
16. Paul A., Ponomaryov A. The bearing behavior of geogrid reinforced, crushed stone columns in comparison to nonreinforced concrete pile foundations // Proceedings of the Eurogeo 3. 2004. Vol. II. P. 285–289.
17. Гладков И.Л., Жемчугов А.А., Малинин Д.А. Технология струйной цементации грунтов в условиях плотной городской застройки // Жилищное строительство. 2013. № 9. С. 6–9.
18. Софьин Р.И., Шенкман Р.И. Технология усиления фундаментов реконструируемых зданий инъекционными сваями // Master's Journal. 2017. № 2. С. 74–84.
19. Харченко И.Я., Меркин В.Е., Симутин А.Н., Зерцалов М.Г. Применение технологии компенсационного нагнетания для защиты зданий и сооружений

при строительстве тоннелей // Транспортное строительство. 2015. № 1. С. 6–9.

20. Жан-Луи Валет. Компенсационное нагнетание: технология в реальном времени // Метро и тоннели. 2002. № 4. С. 16–19.

21. Кравченко В.В. Исследование укрепления грунтового массива при строительстве тоннелей закрытым способом методом компенсационного нагнетания // Исследования автодорожных и городских мостов и тоннелей: сб. науч. тр. М. : МАДИ (ГТУ), 2009. С. 20–28.

22. Маковский Л.В., Кравченко В.В. Применение компенсационного нагнетания при строительстве подземных сооружений в сложных градостроительных условиях // Транспортное тоннелестроение. Современный опыт и перспективные разработки : сб. науч. тр. / под ред. В.Е. Меркина. М. : ЦНИИС, 2008. С. 112–120.

23. Маковский Л.В., Кравченко В.В. Определение параметров компенсационного нагнетания при строительстве тоннелей в сложных градостроительных условиях // Проектирование автомобильных дорог : сб. науч. тр. М. : МАДИ (ГТУ), 2009. С. 119–124.

24. Bezuijen A., van Tol F. Compensation grouting in sand, fractures and compaction // Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Rotterdam, 2007. Pp. 1257–1262.

25. Зерцалов М.Г., Симутин А.Н., Александров А.В. Технология компенсационного нагнетания для защиты зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 32–40. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.6.32-40

26. Алирзаев Э.И., Иванова А.И. Выбор защитных мероприятий для предотвращения сверхнормативных осадок здания при строительстве станционного комплекса «Стахановская улица» // Дни студенческой науки : сб. НИУМГСУ, 2018. С. 1208–1210.

27. Bellendir E.N., Aleksandrov A.V., Zertsalov M.G., Simutin A.N. Building and Structure Protection and Leveling Using Compensation Grouting Technology // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50. Issue 2. Pp. 142–146. DOI: 10.1007/s10749-016-0674-y

28. Соколов Н.С. Алгоритм выбора геотехнических технологий для целей усиления слабых оснований // Жилищное строительство. 2019. № 8. С. 50. DOI: 10.31659/0044-4472-2019-8-50-54

29. Dement'eva M.E. Algorithm for determining the suitability for exploitation of structures of buildings // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 463. P. 032022. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032022

Поступила в редакцию 14 января 2020 г.

Принята в доработанном виде 6 февраля 2020 г.

Одобрена для публикации 27 февраля 2020 г.

О Б АВТОРАХ: **Эмиль Имран Оглы Алирзаев** — инженер; Мосинжпроект; 101100, г. Москва, Сверчков пер., д. 4/1; emil-alirzaev@yandex.ru;

Марина Евгеньевна Дементьева — кандидат технических наук, доцент кафедры жилищно-коммунального комплекса; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2467-3290, Scopus: 57194452801, ResearcherID: Q-3399-2017, ORCID: 0000-0002-1469-7297; DementevaME@gic.mgsu.ru.

REFERENCES

1. Kharchenko I., Zertsalov M., Simutin A., Harchenko A. Basic calculation and technology of control of strain-stress soil conditions by compensation grouting. *Metro and tunnels*. 2015; 5:20-23. (rus.).

2. Yin Z.Z. Application of hydrostatic leveling system in metro monitoring for construction deep excavation above shield tunnel. *Applied Mechanics and Materials*. 2013; 333-335:1509-1513. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.333-335.1509

3. Shen X., Lu M., Mao S., Wu X. Integrated approach to machine guidance and operations monitoring in tunnel construction. *The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC)*. 2014; 103-109. DOI: 10.22260/isarc2014/0014 URL: http://www.iaarc.org/publications/fulltext/isarc2014_submission_78.pdf (date of the application 05.03.20)

4. Dremov V.I., Mazein S.V., Prudnikov A.D., Akutin D.V. Projected industrial safety activities in the Moscow subway construction. *Metro and tunnels*. 2016; 5:31-38. (rus.).

5. Dement'eva M.E., Utkin R.M. Features of exploitation of underground facilities in the far north. *International scientific seminar on modern construction technologies and materials: collection of materials of the international scientific conference*. 2017:814-817. (rus.).

6. Garber V.A. Abnormal situations during the construction and operation of the Moscow Metro over the past 40 years. *Metro and tunnels*. 2014; 3:34-35. (rus.).

7. Kornilkov M.V., Polovov B.D., Kriazhevskikh A.N., Kuzmin N.G. Analysis of space-planning and design and

technological solutions for construction and operation of Yekaterinburg and Chelyabinsk metro. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2014; 6:70-78. (rus.).

8. Alpatov S.N. The development of the subway opens up the prospects for integrated development of the underground space. *Metro and tunnels*. 2014; 4:16-17. (rus.).

9. Dement'eva M.E., Minin K.E. Analysis of overlap subway station suitability exploitation. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018; 7:42-52. DOI: 10.12737/article_5b4f02b82615c0.05783178 (rus.).

10. Daller J., Zibert M., Exinger C., Lah M. Implementation of BIM in the tunnel design — Engineering consultant's aspect. *Geomechanics and Tunneling*. 2016; 9(6):674-683. DOI: 10.1002/geot.201600054

11. Schweiger H.F., Falk E. Reduction of settlements by compensation grouting Numerical studies and experience from Lisbon underground. *Tunnels and Metropolises*. Balkema, Rotterdam, 1998; 1047-1052.

12. Knitsch H. Visualization of relevant data for compensation grouting. *Tunnel*. 2008; 3:38-45.

13. Mareeva O.V., Klovskiy A.V. Assessment of the efficiency of strengthening of reinforced concrete columns during reconstruction. *Prirodooobustroytvo*. 2017; 2: 33-41. (rus.).

14. Polishchuk A.I., Petukhov A.A. Methods of strengthening foundations and basement constructions of reconstructed buildings. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2018; 9(1):42-51. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.04 (rus.).

15. Gruzin A.V., Gruzin V.V. Method of the cast-in-place friction pile well walls local soil compaction. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 1050:012031. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012031

16. Paul A., Ponomaryov A. The bearing behavior of geogrid reinforced, crushed stone columns in comparison to nonreinforced concrete pile foundations. *Proceedings of the Eurogeo 3*. Munich, 2004; II:285-289.

17. Gladkov I.L., Zhemchugov A.A., Malinin D.A. Technology of jet cementation of soils in dense urban areas. *Housing construction*. 2013; 9:6-9. (rus.).

18. Sof'in R.I., Schenkman R.I. Technology of strengthening the foundations of reconstructive buildings by injection piles. *Master's Journal*. 2017; 2:74-84. (rus.).

19. Kharchenko I.Ya., Merkin V.E., Simutin A.N., Zertsalov M.G. Application of compensation grouting technology for protection of buildings and constructions during tunneling. *Transport construction*. 2015; 1:6-9. (rus.).

20. Zhan-Lui Valet. Compensatory injection: real-time technology. *Metro and tunnels*. 2002;4:16-19. (rus.).

21. Kravchenko V.V. Study of strengthening the soil mass during the construction of tunnels in a closed way by the method of compensatory injection. *Research of road and city bridges and tunnels: a collection of scientific works*. Moscow, MADI (GTU), 2009; 20-28. (rus.).

22. Makovsky L.V., Kravchenko V.V. The use of compensatory injection in the construction of underground structures in difficult urban conditions. *Transport tunneling. Modern experience and promising developments: collection of scientific papers*. Moscow. TsNIIS. 2008; 112-120. (rus.).

23. Makovsky L.V., Kravchenko V.V. Determination of compensation injection parameters during the construction of tunnels in difficult urban conditions. *Road design: a collection of scientific works*. Moscow, MADI (GTU), 2009; 119-124. (rus.).

24. Bezuijen A., van Tol F. Compensation grouting in sand, fractures and compaction. *Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Rotterdam, 2007; 1257-1262.

25. Zertsalov M.G., Simutin A.N., Aleksandrov A.V. Application of compensation grouting technology for protection of buildings and structures. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2015; 6:32-40. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.6.32-40. (rus.).

26. Alirzaev E.I., Ivanova A.I. The choice of protective measures to prevent excessive precipitation of the building during the construction of the station complex "Stakhanovskaya street". *Days of student science: collection*. NIU MGSU, 2018; 1208-1210. (rus.).

27. Bellendir E.N., Aleksandrov A.V., Zertsalov M.G. et al. Building and Structure Protection and Leveling Using Compensation Grouting Technology. *Power Technology and Engineering*. 2016; 50:142-146. DOI: 10.1007/s10749-016-0674-y

28. Sokolov N.S. Algorithm for Selection of Geo-technical Technologies for Strengthening of Weak Bases. *Housing Construction*. 2019; 8:50. DOI:10.31659/0044-4472-2019-8-50-54 (rus.).

29. Dement'eva M.E. Algorithm for Determining the Suitability for Exploitation of Structures of Buildings. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 463:032022. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032022

Received October 14, 2020.

Adopted in a revised form on February 6, 2020.

Approved for publication February 27, 2020.

BIONOTES: **Emil Imran Oglu Alirzaev** — engineer; **Mosinzhpoeekt**; 4/1 Sverchkov st., Moscow, 101100, Russian Federation; emil-alirzaev@yandex.ru;

Marina E. Dement'eva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Housing and Communal Services; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2467-3290, Scopus: 57194452801, ResearcherID: Q-3399-2017, ORCID: 0000-0002-1469-7297; DementevaME@gic.mgsu.ru.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список литературы.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы (\mathbf{a} , \mathbf{b} и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список литературы и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках литературы, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список литературы рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка литературы редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

УДК 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотаций.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна — на английском языке

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется

представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНиП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке — в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Вionotes: **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.

	Форма № ПД-4																																																																																					
<p>Извещение</p> <p>Кассир</p>	<p>УФК по г.Москве (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001</p> <p style="text-align: center;">(наименование получателя платежа)</p> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; border-bottom: 1px solid black; text-align: center;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>7</td><td>7</td><td>1</td><td>6</td><td>1</td><td>0</td><td>3</td><td>3</td><td>9</td><td>1</td></tr> </table> <p style="text-align: center; font-size: 0.8em;">(ИНН получателя платежа)</p> </td> <td style="width: 50%; border-bottom: 1px solid black; text-align: center;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>4</td><td>0</td><td>5</td><td>0</td><td>1</td><td>8</td><td>1</td><td>0</td><td>8</td><td>4</td><td>5</td><td>2</td><td>5</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>7</td><td>9</td></tr> </table> <p style="text-align: center; font-size: 0.8em;">(номер счета получателя платежа)</p> </td> </tr> <tr> <td style="border-bottom: 1px solid black;">в ГУ Банка России по ЦФО</td> <td style="border-bottom: 1px solid black;">БИК 044525000</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">(наименование банка получателя платежа)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">КБК <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>3</td><td>0</td></tr> </table></td> </tr> <tr> <td colspan="2">ОКТМО <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>4</td><td>5</td><td>3</td><td>6</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table></td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <p>Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз. подписка на июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2020 г.</p> </td> </tr> <tr> <td style="border-bottom: 1px solid black;"></td> <td style="border-bottom: 1px solid black; text-align: right;">Вестник МГСУ</td> </tr> <tr> <td style="border-bottom: 1px solid black;"></td> <td style="border-bottom: 1px solid black; text-align: right;">(номер лицевого счета (код) плательщика)</td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <p>Ф.И.О. _____</p> <p>плательщика _____</p> <p>Адрес _____</p> <p>плательщика _____</p> </td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: right;">Сумма</td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <p>Сумма _____</p> <p>платежа 3 822 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.</p> <p>Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 ____ г.</p> <p>С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.</p> </td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: right;">Подпись _____</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: right;">плательщика _____</td> </tr> </table>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>7</td><td>7</td><td>1</td><td>6</td><td>1</td><td>0</td><td>3</td><td>3</td><td>9</td><td>1</td></tr> </table> <p style="text-align: center; font-size: 0.8em;">(ИНН получателя платежа)</p>	7	7	1	6	1	0	3	3	9	1	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>4</td><td>0</td><td>5</td><td>0</td><td>1</td><td>8</td><td>1</td><td>0</td><td>8</td><td>4</td><td>5</td><td>2</td><td>5</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>7</td><td>9</td></tr> </table> <p style="text-align: center; font-size: 0.8em;">(номер счета получателя платежа)</p>	4	0	5	0	1	8	1	0	8	4	5	2	5	2	0	0	0	0	7	9	в ГУ Банка России по ЦФО	БИК 044525000	(наименование банка получателя платежа)		КБК <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>3</td><td>0</td></tr> </table>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	ОКТМО <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>4</td><td>5</td><td>3</td><td>6</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>		4	5	3	6	5	0	0	0	<p>Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз. подписка на июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2020 г.</p>			Вестник МГСУ		(номер лицевого счета (код) плательщика)	<p>Ф.И.О. _____</p> <p>плательщика _____</p> <p>Адрес _____</p> <p>плательщика _____</p>		Сумма		<p>Сумма _____</p> <p>платежа 3 822 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.</p> <p>Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 ____ г.</p> <p>С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.</p>		Подпись _____		плательщика _____	
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>7</td><td>7</td><td>1</td><td>6</td><td>1</td><td>0</td><td>3</td><td>3</td><td>9</td><td>1</td></tr> </table> <p style="text-align: center; font-size: 0.8em;">(ИНН получателя платежа)</p>	7	7	1	6	1	0	3	3	9	1	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>4</td><td>0</td><td>5</td><td>0</td><td>1</td><td>8</td><td>1</td><td>0</td><td>8</td><td>4</td><td>5</td><td>2</td><td>5</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>7</td><td>9</td></tr> </table> <p style="text-align: center; font-size: 0.8em;">(номер счета получателя платежа)</p>	4	0	5	0	1	8	1	0	8	4	5	2	5	2	0	0	0	0	7	9																																																						
	7	7	1	6	1	0	3	3	9	1																																																																												
	4	0	5	0	1	8	1	0	8	4	5	2	5	2	0	0	0	0	7	9																																																																		
	в ГУ Банка России по ЦФО	БИК 044525000																																																																																				
	(наименование банка получателя платежа)																																																																																					
	КБК <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>3</td><td>0</td></tr> </table>		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0																																																															
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0																																																																	
	ОКТМО <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>4</td><td>5</td><td>3</td><td>6</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>		4	5	3	6	5	0	0	0																																																																												
	4	5	3	6	5	0	0	0																																																																														
<p>Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз. подписка на июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2020 г.</p>																																																																																						
	Вестник МГСУ																																																																																					
	(номер лицевого счета (код) плательщика)																																																																																					
<p>Ф.И.О. _____</p> <p>плательщика _____</p> <p>Адрес _____</p> <p>плательщика _____</p>																																																																																						
Сумма																																																																																						
<p>Сумма _____</p> <p>платежа 3 822 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.</p> <p>Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 ____ г.</p> <p>С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.</p>																																																																																						
Подпись _____																																																																																						
плательщика _____																																																																																						

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>



