

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 17 Выпуск 5/2022
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 17. Выпуск 5
2022**

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

Сквозной номер 162

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 17. Issue 5
2022**

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

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 23-93
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	23.05.2022.
Подписан в свет	27.05.2022.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 15,94. Тираж 100 экз. (1-й завод 50 экз.). Заказ № 169

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

Редакционная коллегия

Павел Алексеевич Акимов, д-р техн. наук, проф., академик РААСН, ректор, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Аркадий Николаевич Ларионов, д-р техн. наук, проф., и.о. зав. каф. экономики и управления в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Россия

Инесса Галеевна Лукманова, д-р техн. наук, проф., проф. каф. экономики и управления в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Россия

Левон Рафаэлович Маилян, академик РААСН, д-р техн. наук, проф., проф. каф. автомобильных дорог, Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

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

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

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

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

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

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

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

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

Николай Павлович Осмоловский, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт системных исследований Польской академии наук, Варшава, Республика Польша

Андрей Будимирович Пономарев, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

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

Светлана Васильевна Самченко, д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительного материаловедения, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: *Анна Александровна Дядичева*

Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

Корректор: *Оксана Валерьевна Ермихина*

Дизайн и верстка: *Алина Германовна Алейникова*

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

Председатель редакционного совета

Александр Романович Туснин, д-р техн. наук., доц., и.о. зав. каф. металлических и деревянных конструкций, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

Редакционный совет

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

Николай Владимирович Баничук, д-р физ.-мат. наук, проф., зав. лаб. механики и оптимизации конструкций, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Игорь Андреевич Бондаренко, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р архитектуры, проф., директор, Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «ЦНИИП Минстроя России» Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства (НИИТИАГ), Москва, Российская Федерация

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

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

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

Александр Витальевич Гинзбург, д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

Рашид Абдуллович Мангушев, д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. каф. геотехники, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Владимир Ильич Травуш, д-р техн. наук, проф., академик и вице-президент РААСН, зам. генерального директора-главный конструктор, ЗАО «Горпроект», Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company "ASV Publishing House", 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru , journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	23.05.2022

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

Arkady N. Larionov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Inessa G. Lukmanova, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Levon R. Mailyan, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

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

Petr G. Grabovyy, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Stanislav Jemiolo, Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Republic of Poland

Rolf Katzenbach, Technical University of Darmstadt, Federal Republic of Germany

Marta Kosior-Kazberuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

Dmitry V. Kozlov, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

Sergey V. Kuznetsov, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russian Federation

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

Nikolai P. Osmolovskii, Systems Research Institute, Polish Academy of Sciences, Republic of Poland

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

Svetlana V. Samchenko, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Nikolay I. Vatin, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

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

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Т.В. Иванцык, А.М. Салимов

Северный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований 547

М.А. Слепнев, А.С. Аль-катрани

Разработка градостроительной информационной системы населенных мест на территории нефтедобычи на примере округа Зубайр мухафазы Басра 559

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

В.В. Надольский

Надежность стального элемента при потере местной устойчивости стенки 569

М.Н. Курсанов

Деформации и собственная частота колебаний фермы пространственной модели многоэтажного здания. 580

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

А.А. Ковригин, М.Ю. Слесарев

Экологический мониторинг атмосферы вблизи полигона «Саларьево» 589

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

И.Г. Кантаржи, А.Г. Гогин, А.В. Курпин

Аналитические и численные исследования размывов свайного основания морского причала 603

Б.В. Архипов, Д.А. Шапочкин, А.Л. Лобов, В.И. Батов, О.В. Тихонова

Моделирование переноса наносов в Каспийском море на составных сетках для одновременного учета глобального и локального масштабов 614

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.Г. Первов, Д.В. Спицов

Модернизация установок обратного осмоса, используемых для питьевого водоснабжения, с целью сокращения эксплуатационных затрат. 628

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

С.Б. Сборщиков, Л.А. Маслова

Применение логистики регулирующих воздействий при реинжиниринге объектов транспортной инфраструктуры 646

О.А. Бездельникова, Л.В. Шепелева

Расчет объемов дорожной одежды при ремонте автомобильных дорог в IndorCAD/Road 655

Требования к оформлению научной статьи 663

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Timur V. Ivantsyk, Alexey M. Salimov

The north wing of the Musin-Pushkin estate in Moscow: historical, architectural and field studies. 547

Mihail A. Slepnev, Anwar Sabeeh Al-qatany

Development of an urban planning information system for settlements located in oil production areas: the case of Al-Zubair district in Basra governorate 559

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

Vitali V. Nadolski

Reliability of a steel member in case of loss of local stability of a web 569

Mikhail N. Kirsanov

Deformations and natural vibration frequency of a three-dimensional truss in a multi-storey building 580

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Artur A. Kovrigin, Mikhail Yu. Slesarev

Ecological monitoring of the atmosphere close to Salaryevo landfill 589

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Izmail G. Kantarzhi, Alexander G. Gogin, Alexander V. Kuprin

Analytical and numerical studies on the scouring of a pile foundation of a marine terminal. 603

Boris V. Arkhipov, Dmitry A. Shapochkin, Alexander L. Lobov, Vladimir I. Batov, Olga V. Tikhonova

Using nested grids to simulate sediment transport in the Caspian Sea with account taken of global and local scales 614

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Alexey G. Pervov, Dmitriy V. Spitsov

Reducing operating costs through modernization of reverse osmosis facilities used to produce drinking water 628

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Sergey B. Sborshchikov, Lyubov A. Maslova

Application of logistics of regulatory impacts in the reengineering of transport infrastructure facilities. 646

Olga A. Bezdelnikova, Lubov V. Shepeleva

Using IndorCAD/Road software to calculate the amount of road pavement materials needed to repair a motor road 655

Requirements for research paper design 663

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 17. Выпуск 5, 2022
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 17. Issue 5, 2022

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

- 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);
- 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки);
- 2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов (технические науки);
- 2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки);
- 2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки);
- 2.1.9. Строительная механика (технические науки);
- 2.1.10. Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки);
- 2.1.11. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура);
- 2.1.11. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (технические науки);
- 2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура);
- 2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки);
- 2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки);
- 2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура);
- 05.02.22. Организация производства (по отраслям) (технические науки);
- 05.23.07. Гидротехническое строительство (технические науки);
- 05.23.16. Гидравлика и инженерная гидрология (технические науки);
- 08.00.05. Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности) (экономические науки).

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 72:351.853

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.547-558

Северный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натуральных исследований

Тимур Викторович Иванцык¹, Алексей Маратович Салимов²

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

² *Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства — филиал Центрального научно-исследовательского и проектного института Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (НИИТИАГ — филиал ЦНИИП Минстроя России); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается один из объектов культурного наследия, участвующий в формировании архитектурного облика усадьбы Мусиных-Пушкиных, расположенной на пересечении Доброслободской и Спартаковской улиц в Москве (ныне комплекс зданий Московского государственного строительного университета), — северный флигель ансамбля, оформляющий северный угол усадьбы и красную линию по Спартаковской улице. Будучи памятником архитектуры федерального значения, это сооружение к настоящему времени претерпело многочисленные обновления и переустройства, что отразилось как на фасадах, так и на интерьерах памятника. Цель исследования — проследить историю формирования флигеля, рассматривая его объем в контексте окружающих строений, выявить первоначальный облик памятника, а также определить его строительную периодизацию, и как следствие, — предложить графическую реконструкцию этой постройки, которая будет учитывать не только наиболее ранний период ее существования, но и тот этап, который обогатил это здание новыми, не менее интересными архитектурными формами.

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

Результаты. Выявлена строительная периодизация памятника, датированы его существующие объемы, обнаружены и изучены первоначальные элементы постройки и выделены более поздние напластования. Все это дало возможность предложить графическую реконструкцию северного флигеля, ориентированную на начальные этапы в его строительной истории.

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

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Иванцык Т.В., Салимов А.М. Северный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натуральных исследований // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 5. С. 547–558. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.547-558

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

The north wing of the Musin-Pushkin estate in Moscow: historical, architectural and field studies

Timur V. Ivantsyk¹, Alexey M. Salimov²

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

² *Scientific Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning — branch of the Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (NIITIAG); Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The authors study the cultural heritage site that somehow shapes the architectural appearance of the Musin-Pushkin estate, located at the intersection of Dobroslobodskaya and Spartakovskaya streets in Moscow (now this group of buildings accommodates the Moscow State University of Civil Engineering); it is the north wing of the architectural ensemble in the northern corner of the estate along the frontage line of Spartakovskaya street. This building is a cultural heritage site of federal significance; its interiors and facades have undergone numerous renovations and reorganizations. The main purpose of this work is to trace the history of this wing by analyzing it in the context of surrounding buildings, identify the initial appearance of this monument, track the periods of its construction, and, as a result, propose its graphic reconstruction, that will encompass not only its earliest period, but also the stage when its architectural form was changed to something new but not less interesting.

Materials and methods. The method of comprehensive research was employed to study the monument. This method encompasses a search for and analysis of sources and literature, field studies, including probing, pit boring and taking measurements, as well as the chemical analysis of building and finishing materials. The comparative method was used to match this construction facility against other stylistically and typologically similar buildings.

Results. As a result of the studies, the monument's construction periodization was traced, the dates of its present-day appearance were identified, initial elements of the building were identified and studied, its further changes were traced to make a graphic reconstruction of the north wing since its very first days.

Conclusions. The proposed reconstruction of the monument is a result of its comprehensive study needed to reconstruct the initial appearance of the building, including its missing parts. This project will allow tracing the history of the architectural appearance of a most interesting manor estate in Moscow.

KEYWORDS: manor estate in Razgulyay, Musin-Pushkin manor in Moscow, M.F. Kazakov, classicism, north wing, Spartakovskaya street

FOR CITATION: Ivantsyk T.V., Salimov A.M. The north wing of the Musin-Pushkin estate in Moscow: historical, architectural and field studies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):547-558. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.547-558 (rus.).

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

ВВЕДЕНИЕ

Комплекс зданий Московского государственного строительного университета — один из архитектурных ансамблей Москвы эпохи классицизма, созданный в начале XIX в. стараниями известного вельможи екатерининского времени, коллекционера и ученого Алексея Ивановича Мусина-Пушкина. Согласно сложившейся историографической традиции, автором этого комплекса мог быть М.Ф. Казаков или зодчий, «близкий его кругу» [1]. За время своего существования ансамбль на Разгуляе претерпел немало изменений, что способствовало внедрению в структуру классицистической усадьбы ряда дисгармонирующих объемов и утрате отдельных элементов комплекса. Такая ситуация сложилась в отношении ограды по улице Спартаковской, чей исторический облик был в значительной степени утрачен [2]. Подобная участь постигла и северный флигель усадьбы, формирующий границы территории ансамбля с севера (рис. 1).

Северный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных расположен к северо-востоку от главного корпуса по красной линии Спартаковской улицы. Представляет собой сильно вытянутое по оси восток-запад трапециевидное в плане здание, ни одна из наружных стен которого не имеет параллельную ей стену. Основным фасадом двухэтажной перекрытой вальмовой кровлей постройки является северный¹. Данная не единожды укрепляемая лицевая поверхность лишена участка,

который бы центрировал данный фасад. Тем не менее условный центральный ризалит у нее есть. В большей мере он смещен в западную половину флигеля. Это девятиосевая плоскость, разбитая по первому ярусу широкими рустованными пилястрами на три секции, в каждой из которых или по три окна, или два оконных проема фланкируют близкую по площади нишу.

Все три элемента каждой секции первого яруса отделены друг от друга узкими пилястрами. Капители этих пилястр сверху упираются в очень широкий межъярусный пояс, в структуре которого находятся капители и импосты рустованных пилястр. В отличие от первого, второй ярус лишен каких-ли-



Рис. 1. Москва. Северный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице. Вид главного (северного) фасада. Существующее состояние. Фото 2021 г.

Fig. 1. Moscow. The north wing of the Musin-Pushkin estate viewed from Spartakovskaya street. The main (northern) facade. The current state. The photo was made in 2021

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

бо декоративных элементов (если не считать профилированного карниза). Здесь нет не только пилястр, но и наличников.

Центральный ризалит подчеркнуто асимметричного северного фасада фланкируется с востока четырехосевой, а с запада небольшой одноосевой плоскостью. При этом четырехосевой объем членится незначительными по выносу боковыми ризалитами, первый ярус которых оформлен большими арочными нишами, декорированными по контуру рустованными с замковым акцентом элементами. У остальных шести окон этой плоскости нет каких-либо обрамлений.

Западная одноосевая фланкирующая плоскость имеет только типологически близкую восточным нишу. Во втором ярусе здесь отсутствует даже окно (или ниша).

Южный дворовый фасад здания типологически близок северному, но в данном случае широкие пилястры первого яруса девятиосевого центрального ризалита не имеют рустовки, хотя узкие пилястры в каждой из трех секций присутствуют, но срединная часть здесь лишена и окон, и ниш. Отличие заключается в том, что во втором ярусе наличествует полуциркулярная ниша, центральная часть которой пробита оконным проемом с лучковой перемычкой. Эти окна фланкированы небольшими лопатками. Делит ярусы широкий пояс, в структуре которого находятся капители и импосты пилястр первого этажа (рис. 2).

В одноосевых фланкирующих плоскостях этого фасада в первом ярусе присутствуют дверные проемы, а во втором — окна, лишенные наличников. С востока к фасаду под углом 90 градусов примыкает короткий одноосевой объем с дверью в первом ярусе и окном во втором.



Рис. 2. Москва. Северный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице. Вид дворового (южного) фасада. Существующее состояние. Фото 2021 г.

Fig. 2. Moscow. The north wing of the Musin-Pushkin estate in Spartakovskaya street. The rear (southern) facade. The current state. The photo was made in 2021

Восточный уличный фасад флигеля — семиосевой, но расположение проемов и ниш делает его асимметричным. Широкая угловая северная плоскость по второму ярусу не имеет каких-либо проемов, а по первому устроена большая арочная ниша с обрамлением, аналогичным тому, что у ниш северного фасада. В полуциркулярной нише расположена еще прямоугольная ниша. По первому этажу рустовка фрагментарно закрепляет и северо-восточный угол здания.

Остальная более протяженная часть восточного фасада пробита шестью окнами по второму ярусу и пятью по первому. В дополнение между проемами первого этажа устроены лопатки, которые сверху увязаны с широким межъярусным поясом (рис. 3).

Предельно лаконичен западный фасад флигеля. Здесь кроме профилированной междуэтажной тяги и карниза других элементов нет.

Под западной частью корпуса устроен двухсекционный подвал со сводчатыми перекрытиями. В каждый из двух компартиментов со двора ведет лестница. В остальном интерьеры памятника сохранили первоначальные каменные внутренние простенки, но его убранство является свидетелем обновлений, которые произошли здесь в последние десятилетия. Это интерьеры советского периода, выполненные с применением железобетонных перекрытий и современных отделочных материалов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование данного памятника проведено с использованием комплекса методов, направленных на изучение объекта культурного наследия, его истории, этапов формирования и строительной периодизации. Особое внимание уделено архитектурно-археологическому направлению, анализу



Рис. 3. Москва. Северный флигель усадьбы Мусиных-Пушкиных по Спартаковской улице. Восточный фасад. Существующее состояние. Фото 2021 г.

Fig. 3. Moscow. The north wing of the Musin-Pushkin estate in Spartakovskaya street. The eastern facade. The current state. The photo was made in 2021

выявленных объемов, фиксации их параметров и моделированию объемно-пространственной композиции постройки. Материалами для исследования стали выявленные в ходе натурных изысканий подлинные фрагменты стен некогда значительного по объему памятника, что и легло в основу концептуального решения и графической реконструкции рассматриваемого здания.

В рамках комплексного подхода осуществлено изучение в следующих направлениях.

1. Выполнены поиск и анализ источников и литературы относительно исследуемого объема и ансамбля усадьбы в целом.

2. Проведены натурные исследования, сопровождавшиеся устройством зондажей, закладкой шурфов, обмерными работами и химико-технологическим изучением строительных и отделочных материалов.

3. Используя сравнительно-исторический метод, подобраны стилистически и типологически близкие аналоги северному флигелю усадьбы Мусиных-Пушкиных.

4. Подготовлена графическая реконструкция памятника.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Служебное здание на месте ныне существующего северного флигеля появилось как минимум в XVIII столетии, но вплоть до конца XVIII в. здесь находилась деревянная постройка [3]. Сложно-составным оставалось это сооружение и в начале 1800-х гг., когда основная часть построек усадьбы А.И. Мусина-Пушкина уже была возведена в камне. К 1804 г. западная значительная часть флигеля была еще деревянной постройкой (или ее собирались строить в камне), а ее западная треть являлась в тот период каменным строением (рис. 4) [4].

Ситуация изменилась в ближайшие годы, поскольку в сентябре 1813 г., когда Мусины-Пушкины возобновляли усадьбные постройки после грандиозного пожара, уничтожившего значительную часть Москвы, помимо «главного трехэтажного корпуса» предполагалось отремонтировать и «два жилых и два нежилых одноэтажных флигеля». План 1814 г. засвидетельствовал присутствие на территории ядра усадьбы исключительно каменных построек: трехэтажной, двухэтажных и одноэтажных [5]. Тот факт, что после пожара их собирались «поправить» и устроить на этих зданиях кровлю [6], позволяет полагать, что в первое десятилетие XIX в. все эти сооружения были каменными. Среди данных строений был и северный флигель.

О характере объемно-пространственной композиции этого сооружения, сложившегося в первое десятилетие XIX в., определенно свидетельствуют планы усадьбы, выполненные в 1814 и 1824 гг. Наиболее подробен чертеж середины 1820-х гг. На нем срединная девятиосевая часть корпуса показана

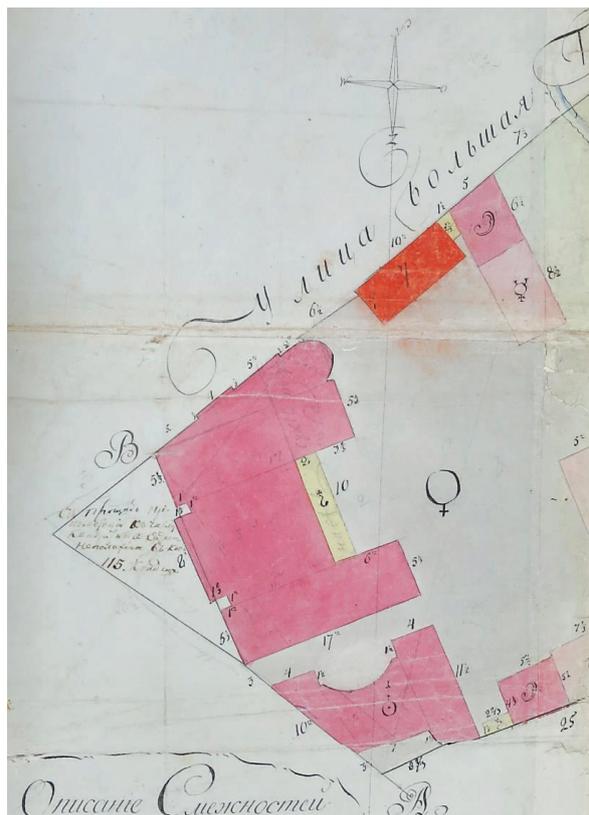


Рис. 4. Москва. Северный флигель на «Геометрическом плане дому, состоящему в Басманной части третьем квартале под № 312 и 321-м Его сиятельства графа Алексея Ивановича Мусина Пушкина...». 1802–1804 гг. ЦГА Москвы. Ф. Т-1. Оп. 2. Д. 173 (437/291; 1)

Fig. 4. Moscow. The north wing demonstrated as part of the “Geometrical design of the building in Basmannaya area, 3rd block, No. 312 and 321, owned by his Excellency Count Aleksey Ivanovich Musin-Pushkin...” 1802–1804 years. Moscow Central State Archive. Fund volume 1. L. 2. File 173 (437/291; 1)

в качестве двухэтажного жилого с подвалом объема, у которого с востока есть одноэтажная жилая пристройка, а с запада примыкает небольшой одноэтажный нежилой объем (рис. 5) [7]. Соотнося документы конца XVIII – первой четверти XIX в., можно констатировать, что наиболее ранней частью существующего флигеля является первый этаж восточного четырехосевого по северному фасаду объема. Позже (вероятно, через несколько лет или почти сразу) выстроили западную двухэтажную (девятиосевую) половину здания, но при этом его западное фланкирующее одноосевое строение в 1824 г. продолжало оставаться одноэтажным сооружением.

Очевидно, после ремонта 1813–1814 гг. серьезных переделок в северном флигеле произведено не было, что косвенно доказывает план 1824 г. Наверное, и в последние годы жизни вдовы А.И. Мусина-Пушкина (Екатерина Алексеевна умерла в 1829 г.) вряд ли появились новые пристройки к существующим зданиям. Новый этап

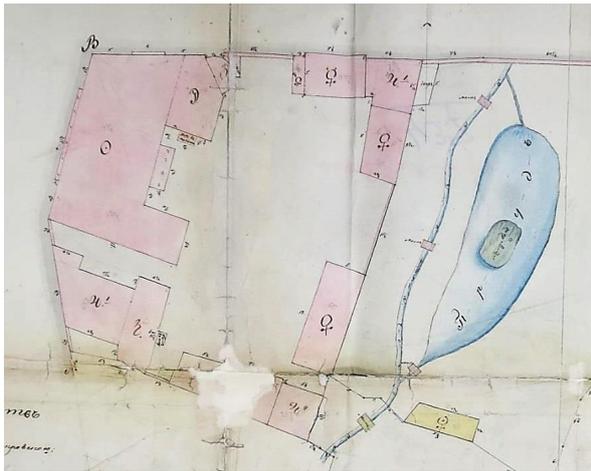


Рис. 5. Москва. Северный флигель на плане «дому графини Екатерины Алексеевны Мусиной Пушкиной, состоящему в Басманной части 3-го квартала под № прежним 312-м, а ныне 297-м». 5 февраля 1824 г. ЦГА Москвы. Ф. Т-1. Оп. 2. Д. 173 (437/291; 2)

Fig. 5. Moscow. The north wing demonstrated as part of the layout “of the house of Countess Ekaterina Alekseevna Musina Pushkina, located in Basmannaya part of the 3rd block that used to have number 312th, and now it’s numbered as the 297th”. February 5, 1824 Central State Archive of Moscow. Fund T-1. L. 2. File 173 (437/291; 2)

в судьбе северного флигеля наступил, видимо, в середине 1830-х гг., когда на территории усадьбы разместилась 2-я Московская гимназия. Вероятно, именно в середине – второй половине 1830-х гг. служебный корпус на Спартаковской улице мог обрести дополнительные объемы, т.е. тогда могли быть надстроены вторым ярусом его одноэтажные фланкирующие «крылья». Косвенно об этом свидетельствует С. Гулевич, когда пишет о том, что уже на начальном этапе в состав гимназического комплекса входили два двухэтажных флигеля [8]. Но более предметно подтверждает эту версию полотно Г.В. Барановского 1847 (1849) г., где в качестве двухэтажного фиксируется западная часть интересующего нас здания, которая в 1824 г. еще была одноэтажной. Этот вывод подкрепляет также вид северного флигеля на картине И.И. Шарлеманя (1853 г.), на которой он изображен близким по высоте двухэтажному строению. Такой вывод подтверждает и фотоснимок 1880-х гг., где это сооружение показано двухэтажным (рис. 6).

Отметим, что двухэтажные корпуса и в 1830-е гг., и в более позднее время служили квартирами для сотрудников гимназии [9]. Так, например, в 1914 г. в этом доме находились квартиры письмоводителя, воспитателя и инспектора [10]. Полагаем, что сразу после размещения в усадьбе Мусиных-Пушкиных 2-й Московской гимназии назначение северного флигеля было таким же.

Несмотря на отдельные иконографические и письменные свидетельства XIX в., в целом вплоть до начала XX в. строительная история северно-

го гимназического флигеля остается практически неизвестной. Может быть, это связано с тем, что каких-то существенных изменений в этот период здесь не происходило, если не считать вполне естественные для любой жилой постройки обновления интерьера.

Небольшое видоизменение северного флигеля произошло в начале XX в. Случилось это, по всей видимости, в начале 1910-х гг. после того, как во дворе был выстроен новый трехэтажный учебный корпус. Эта корректировка видна на плане 1913 г., там же отчетливо обозначен и сложившийся объем северного флигеля, получивший Г-образную в плане форму, и окружающие его строения (рис. 7). К этому же времени (началу XX в.) относится графическая фиксация сформировавшегося к тому периоду здания, на которой показана планировочная структура корпуса и появившиеся к началу XX в. более поздние напластования, в частности пристроенный к западному одноосевому сооружению одноэтажный компартимент (рис. 8, 9) [11].

Вероятно, эта пристройка стала последней в до-революционной истории усадьбы. Осенью 1917 г. в гимназических постройках расположился госпиталь и, возможно, ряд помещений северного флигеля по-прежнему остались жилыми. Здесь мог проживать обслуживающий персонал госпиталя. Допускаем, что отчасти жилыми отдельные компартименты 2-го корпуса остались и в 1920-е гг., когда на территории комплекса находился Дом Красной Армии, а затем (с 1923 г.) — Московский индустриально-педагогический институт имени Карла Либкнехта.

Глобальные преобразования и наибольший урон северному флигелю принесли строительные работы 1930-х гг. Эти мероприятия были направлены на увеличение главного дома и здания гимназии, появившегося в 1910-е гг. Указанные строения получили дополнительный четвертый этаж и новую



Рис. 6. Москва. Северный флигель на фото 2-й Московской гимназии. 1880-е гг. Опубликовано: С. Гулевич «Историческая записка о 50-летию Московской 2-й гимназии. 1835–1885». М., 1885

Fig. 6. Moscow. The north wing in the photo of the 2nd Moscow gymnasium. 1880s. Published in “Historical note about the 50th anniversary of the 2nd Moscow gymnasium. 1835–1885” by S. Gulevich. Moscow, 1885

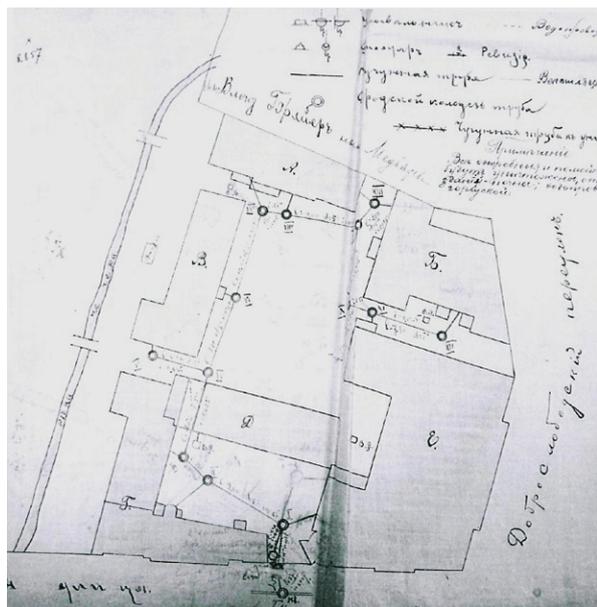


Рис. 7. Москва. Северный флигель на плане участка 2-й Московской гимназии. 1913 г. Архив Мосводоканала. РКС № 2 СЭ № 2. Д. 636. Л. 2

Fig. 7. Moscow. The north wing in the layout of the site of the 2nd Moscow gymnasium. 1913. The Mosvodokanal Archive. Sanitation District No. 2 Maintenance Service No. 2. File 636. Page 2

четырёхэтажную пристройку с севера, для чего была разобрана значительная часть северного флигеля, связанная с восточной границей усадьбы.

Следующий этап в жизни корпуса № 2 начался в 1943 г., когда хозяином домовладения стал Московский инженерно-строительный институт. Очевидно, в первые послевоенные годы особых изменений фли-

гель не претерпел, но в 1950-е гг., когда встал вопрос о ремонте и строительстве новых объемов в структуре институтского комплекса, какие-то интерьерные работы во флигеле, наверное, проводились [12].

Более существенные мероприятия по обновлению северного флигеля предполагалось осуществить в середине 1960-х гг. В этот период намеревались выполнить реставрацию его фасадов, что и было зафиксировано документацией 1966 г. (рис. 10, 11) [13]. Однако через 10 лет (в 1976 г.) был вновь подготовлен эскизный проект реставрации фасадов [14], что позволяет предполагать, что в 1960-е гг. работы по обновлению фасадов северного флигеля так и не были проведены.

Последующие преобразования облика памятника (в 1960-х – 1970-х гг.) носили ремонтно-реставрационный характер, однако ремонтная составляющая все же преобладала, а часть работ, отраженная в проектной документации 1966 г., так и не была осуществлена [15].

В следующий раз к теме фасадной реставрации вернулись во второй половине 1980-х гг. Смета 1987 г. зафиксировала следующий набор мероприятий: «реставрация лицевой поверхности кирпичной кладки отдельными местами, расчистка белокаменного карниза от трудноудаляемых загрязнений и окрасок, реставрация белокаменных подоконников путем устройства вставок, расчистка белокаменных подоконников от трудноудаляемых загрязнений, рытье археологических шурфов в зоне памятника с устройством и разборкой креплений, реставрация белокаменного профилированного карниза с выносом до 22 см, реставрация белокаменного прямолинейного цоколя, отдельными местами до 30 см глубиной, изготовление двер-

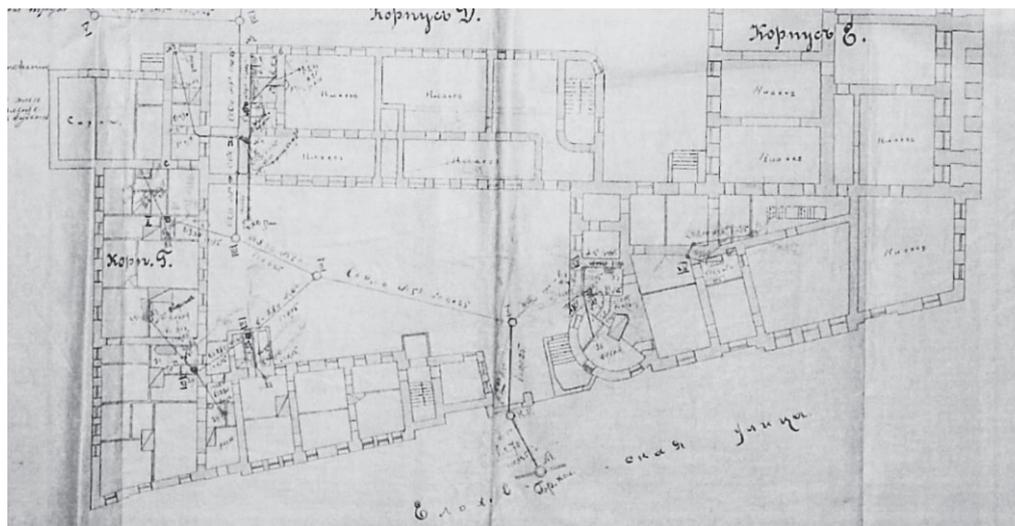


Рис. 8. Москва. Вторая Московская гимназия (усадьба Мусиных-Пушкиных). Общий план северной половины комплекса и планы строений на уровне первого этажа. 1913 г. Архив Мосводоканала. РКС № 2 СЭ № 2. Д. 636. Л. 2

Fig. 8. Moscow. The 2nd Moscow Gymnasium (the Musin-Pushkin estate). The general plan of the northern part of the manor and ground floor plans of buildings. 1913. Mosvodokanal Archive. Sanitation District No. 2 Maintenance Service No. 2. File 636. Page 2

ной коробки в каменной стене, установка дверной коробки в каменной стене, изготовление двери полотна по старому образцу, пригонка и навеска дверных полотен, масляная окраска дверного за-

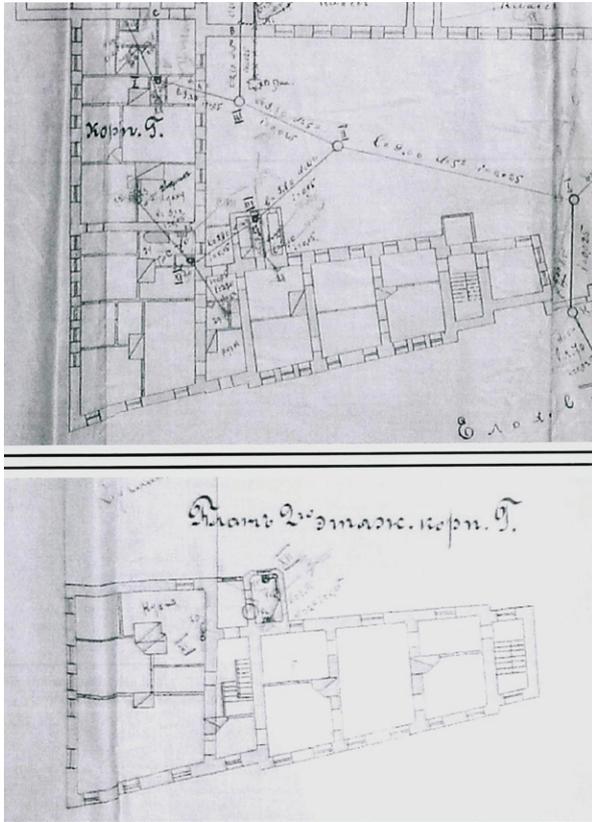


Рис. 9. Москва. Вторая Московская гимназия. Северный флигель. поэтажные планы. 1913 г. Архив Мосводоканала. РКС № 2 СЭ № 2. Д. 636. Л. 2

Fig. 9. Moscow. The 2nd Moscow gymnasium. The north wing. Floor plans. 1913. The Mosvodokanal Archive. Sanitation District No. 2 Maintenance Service No. 2. File 636. Page 2

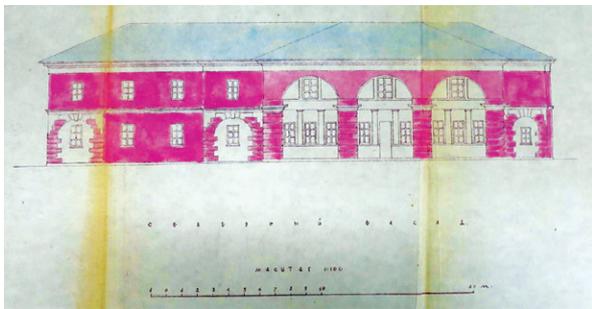


Рис. 10. Москва. Инженерно-строительный институт им. В.В. Куйбышева. Северный флигель (корпус № 2). Северный фасад. Эскизный проект реставрации. 1966 г. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1721. Л. 5

Fig. 10. Moscow. The V.V. Kuibyshev Institute of Civil Engineering. The north wing (Building 2). Northern facade. Conceptual restoration design. 1966. Moscow Central State Archive. Fund T-125. L. 4. File 1721. Page 5

полнения, ремонт штукатурки фасадов отдельными местами цементно-известковым раствором, то же оконных и дверных четвертей, то же столбы и пилястры с прорезными рустами, реставрация и воссоздание штукатурки тяг без разделки углов по камню цементным раствором, разделка от рун углов парапета тяг на горизонтальной поверхности, перетирка штукатурки соскабливанием штукатурки на гладких фасадах, то же рустованных поверхностей, ручная растирка от трудноудаляемых и особо крепких масляных покрасок белокаменного цоколя с соблюдением осторожности, эмульсионная окраска фасада за 2 раза с предварительной расчисткой трещин» и т.д. [16]. Их перечень позволяет полагать, что во второй половине 1970-х гг. работы, которые планировалось провести в 1960-е гг., похоже, так и не удалось осуществить. Эти выводы подтвердили и натурные исследования, сопровождавшиеся выполнением необходимого количества шурфов и зондажей. Основными результатами натурных исследований стали обнаруженные фрагменты подлинных стен утраченной части здания, вошедшие в состав более поздней пристройки (рис. 12), а также несколько вариантов кирпичной кладки стен сохранившегося объема здания, что позволило выявить и упорядочить строительную историю памятника.

Рассматривая строительную периодизацию данного памятника, в его биографии можно выделить пять основных строительных периодов.

I период

Первое десятилетие XIX в. Строительство каменного здания. Интересно, что создавалось оно в этот период в несколько этапов. Первая очередь включала северо-восточную, одноэтажную четырехосевую по северному фасаду часть корпуса. Следующий объем примкнул к первоначальному с запада. Им стало двухэтажное сооружение с фланкирующими его одноэтажными пристройками. Особен-

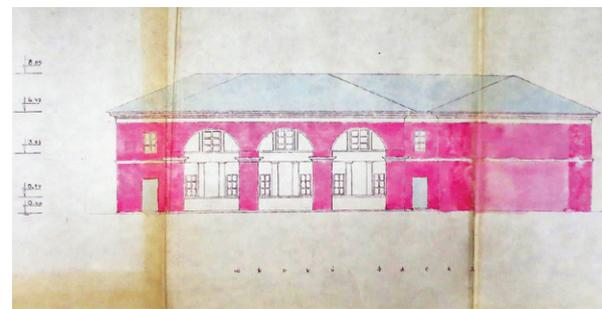


Рис. 11. Москва. Инженерно-строительный институт им. В.В. Куйбышева. Северный флигель (корпус № 2). Южный фасад. Эскизный проект реставрации. 1966 г. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1721. Л. 5

Fig. 11. Moscow. The V.V. Kuibyshev Institute of Civil Engineering. The north wing (Building 2). The southern facade. Conceptual restoration design. 1966. Moscow Central State Archive. Fund T-125. L. 4. File 1721. Page 5

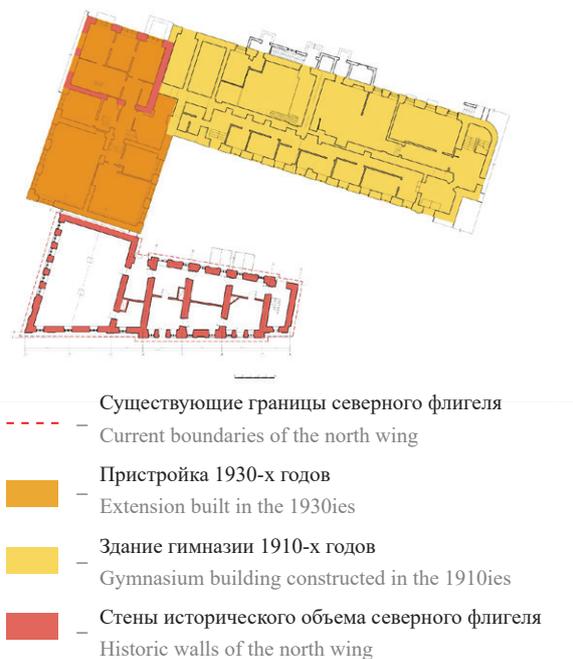


Рис. 12. Москва. Усадьба Мусиных-Пушкиных. Строительная периодизация северного флигеля в структуре сложившейся застройки. Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

Fig. 12. Moscow. The Musin-Pushkin estate. Construction periodization of the north wing currently surrounded by the buildings. Reconstruction by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU

ностями данного строения были три арочные ниши с оконными проемами в центральной их части, располагавшиеся на северном и южном фасадах здания, являвшимися соответственно уличным и дворовым фасадами. В это же время появляется и ныне утраченная часть флигеля, формирующая восточную парковую границу участка.

Послепожарный ремонт 1813–1814 гг., по всей видимости, не затронул сложившуюся к тому времени объемно-пространственную композицию корпуса, ее изменение пришлось на середину 1830-х гг., когда усадьба Мусиных-Пушкиных перешла в ведение 2-й Московской гимназии.

II период (основной)

Вторая треть XIX в. (с середины 1830-х гг.). Вероятно, в это время происходит приспособление интересующего нас флигеля под жилье для сотрудников 2-й Московской гимназии. Для чего все одноэтажные части здания были надстроены вторым ярусом, с устройством в полученных площадях жилых комнат. На главном северном фасаде флигеля были утрачены арочные ниши, а на их месте устроили по два оконных проема. В интерьерах в тот период появились новые перегородки.

Возможно, в это же время формируется ризалит на восточном парковом фасаде здания, ныне утраченной части северного флигеля.

III период

Начало XX в. Этап значительных преобразований усадебного комплекса в целом. В 1910 г. на территории ансамбля «вырастает» трехэтажное, вытянутое по оси восток-запад, здание. Этот гимназический корпус разделил двор усадьбы на две неравные части и соединил главный дом с северным флигелем.

Что касается рассматриваемого строения, то к его сложившемуся к началу XX в. объему пристроены небольшие хозяйственные помещения, для устройства которых было прорублено несколько дверных проемов на месте первоначальных окон. Эти пристройки просуществовали предположительно до конца 1950-х гг.

IV период

1930-е гг. Период наибольших потерь для северного флигеля и объемно-планировочной композиции усадьбы в целом. В это время происходит снос половины исторического объема здания, формировавшего парковую границу домовладения Мусиных-Пушкиных. На его месте возводится новое четырехэтажное строение, ставшее продолжением гимназической постройки 1910-х гг. Тогда же четвертый этаж появляется и на корпусе начала XX в., и на главном доме усадьбы.

V период

1960–1980 гг. Время ремонтно-реставрационных работ, отразившееся по большей части на интерьерах памятника. Кардинально перерабатывается планировочная структура здания, устраиваются современные железобетонные перекрытия. Что касается фасадов, то их ремонтные работы затронули в гораздо меньшей степени. Строители ограничились лишь устройством цементной штукатурки и новых столярных заполнений.

Проект реставрации 1966 г. предполагал восстановление фасадов здания на первую треть XIX в., однако до реализации задуманного дело так и не дошло.

Эта идея получила подтверждение в результате проведенных нами исследований, но если проект 1960-х гг. предусматривал реставрацию сохранившегося объема, то данные, полученные в процессе изучения прилегающих построек, дают возможность предложить воссоздание и утраченной части здания. К ним относится фрагмент северного флигеля, на месте которого в 1930-е гг. было построено четырехэтажное здание, ставшее продолжением гимназического корпуса с севера (рис. 13). В результате проведенных исследований стен подвала и первого этажа удалось обнаружить кирпичные кладки более

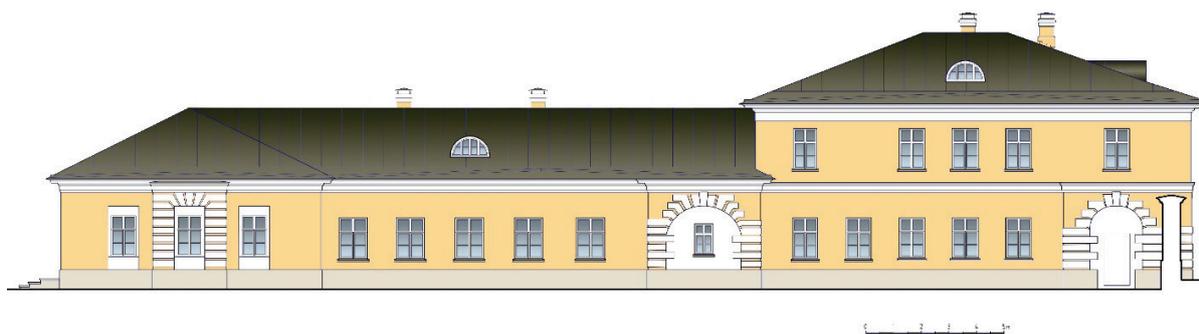


Рис. 13. Москва. Усадьба Мусиных-Пушкиных. Парковый (восточный) фасад северного флигеля. Графическая реконструкция на второй строительный период (вторая треть XIX в.) с архитектурным раскрытием части главного фасада (с востока) на первый строительный период (первое десятилетие XIX в.). Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

Fig. 13. Moscow. The Musin-Pushkin estate. The park (eastern) facade of the north wing. The graphic reconstruction of the 2nd construction period (the middle of the 19th century). Reconstructed by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU

раннего периода, позволяющие представить габариты этого строения. Зондажи показали, что изученные стены выполнены из кирпича тычковым способом на известково-цементном растворе с обработкой шва подскребкой. Подобную кирпичную кладку, которая встречается в стенах северного флигеля, можно датировать второй третью XIX в. [17]. Надо полагать, она принадлежит второму строительному периоду в истории этого здания. Здесь же присутствуют оконные и дверные проемы с клинчатыми перемычками, встречающимися в стенах северного флигеля. В итоге натурное изучение данного участка интересующего нас здания позволило зафиксировать объемные параметры утраченного строения, что в свою очередь подтвердило выводы, сделанные на основе историко-архивных исследований.

Таким образом, обнаружив подлинный объем и опираясь на данные различных источников, мы имеем возможность воссоздать утраченную часть здания и реконструировать полноценный облик памятника. Это Г-образное в плане строение, некогда оформлявшее красные линии усадьбы по Елоховской (Спартакоской) улице и со стороны парка. Восточный парковый фасад был акцентирован с юга трехосевым ризалитом, укрепляющим линию застройки в сторону парка. Аналогичный ризалит оформил типологически близкий корпус, который согласно плану 1913 г. располагался по восточной границе усадьбы южнее северного флигеля (рис. 7) [18]. При этом оба ризалита, словно пропилены, фланкировали въезд на территорию домовладения со стороны парка, ориентируя въезжающего (или входящего), на центральную ось курдонера главного дома.

Подобная планировочная структура сложилась, по всей видимости, в результате преобразований второй трети XIX в., так как на плане 1824 г. парковые ризалиты еще отсутствуют. Учитывая существенную роль формообразующих мероприятий этого времени, целесообразно предложить графиче-

скую реконструкцию рассматриваемого строения на 2-й строительный период, полагая, что он пришелся на вторую треть XIX в.

Значимым в облике северного флигеля являлся и его фасад по улице Спартакоской, в структуре которого так же отразились поздние преобразования, искажившие его первоначальный облик. Проведенные натурные исследования говорят о присутствии в данной части памятника немалого числа перекладок, вероятно связанных с приспособлением северного флигеля под жилье во второй трети XIX в. Это оконные проемы второго этажа центрального ризалита по северному фасаду, которые в отличие от дворового (южного) фасада, сохранившего раннюю организацию стеновой плоскости, представляют собой лишь прямоугольные оконные проемы и ставят перед исследователями ряд вопросов, ответить на которые помогают выполненные на памятнике зондажи.

Анализируя кирпичную кладку, стоит отметить, что первоначальный объем был осуществлен верстовым способом с обработкой шва в виде верхней подрезки, что выполнялось под обмазку, и характерно для начала XIX в. Такая кладка — основная и первоначальная на обследуемом памятнике. Однако в зоне окон центрального ризалита главного фасада кирпичная кладка выше подоконной части произведена тычковым способом и имеет обработку шва подскребкой, что применялось ближе к середине XIX столетия [17]. Полученные материалы говорят о том, что существующие окна второго этажа центрального ризалита по улице Спартакоской не первоначальны, а выполнены, видимо, не ранее второй трети XIX в. Подтверждают этот вывод и проведенные химико-технологические исследования, в результате которых установлено, что кладочные растворы первого и второго строительных периодов различны. Таким образом, ориентируясь на оформление дворового фасада, с большой долей вероятности можно предположить, что глав-

ный фасад здания в уровне второго этажа также оформлен арочными трехчастными нишами с одним центральным окном, аналогично дворовому фасаду.

Подобные решения при организации фасадов были весьма распространены в начале XIX столетия, причем как в жилых, так и хозяйственных постройках. Об этом свидетельствуют выпускавшиеся в 1809–1812 гг. альбомы из «Собрания фасадов ... для частных строений в городах Российской империи», где собраны типовые проекты фасадов, рекомендованные для строительства [19]. Среди предложенных вариантов фасадов можно видеть и типологически близкие исследуемому зданию варианты (рис. 14, 15).

Выявив первоначальный облик и последующие напластования, можно сделать вывод, что

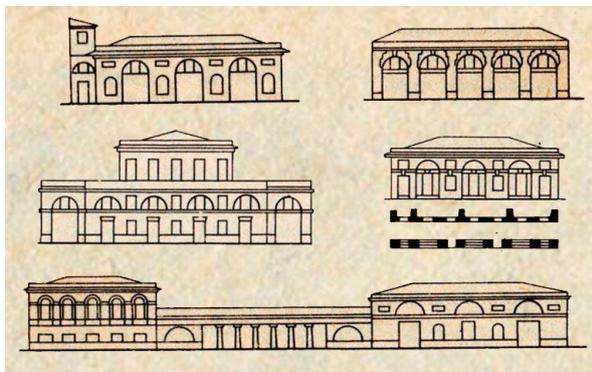


Рис. 14. Собрание фасадов, Его Императорским Величеством высочайше апробированных для частных строений в городах Российской империи. Фасады 2-го, 3-го и 4-го альбомов. 1812 г. Опубликовано: С.С. Ожегов «Типовое и повторное строительство в России в XVIII–XIX веках». М., 1984. С. 86–91

Fig. 14. Collection of facades of private buildings in the cities of the Russian empire, highly approved by His Imperial Majesty. Facades of the 2nd, 3rd and 4th albums. 1812. Published in “Standard and recurrent construction in Russia in the 18th–19th centuries” by S.S. Ozhegov. Moscow, 1984. Pages 86–91

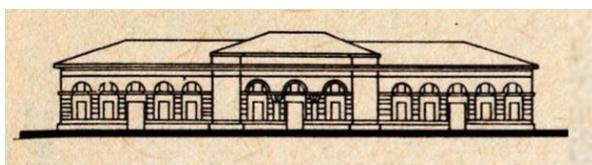


Рис. 15. Провиантские склады в Петербурге из серии «Складские ансамбли первой половины XIX в.». Архитектор В. Стасов. Опубликовано: С.С. Ожегов «Типовое и повторное строительство в России в XVIII–XIX веках». М., 1984. С. 126–127

Fig. 15. Food warehouses in Saint Petersburg. “The warehouse ensembles of the first half of the 19th century” series. Architect V. Stasov. Published in “Standard and recurrent construction in Russia in the 18th–19th centuries” by S.S. Ozhegov. Moscow, 1984. Pages 126–127

наиболее полной и законченной композиция памятника и ансамбля в целом стали не ранее второй трети XIX в. На это время и целесообразно выявить исторический облик здания. Однако было бы несправедливо упустить артефакты, раскрывающие первоначальный облик постройки, искаженный в угоду утилитарной необходимости своего времени. Таким образом, предложенная концепция в рамках архитектурного раскрытия предлагает воссоздать переложенные участки стен и выполнить на главном фасаде здания три арочные трехчастные ниши с центральным оконным проемом в каждой, облик которых будет соответствовать первому десятилетию XIX в. (рис. 16). Такое решение позволит не только сохранить художественную ценность более поздних включений в восточной части здания, но и раскрыть архитектурный облик его наиболее раннего объема в северной части, передав изначальные формы и особенности многокомпонентной постройки.

Что же касается цветового решения, то, как показывают химико-технологические исследования, в начале XIX в. здание было окрашено желтой охрой по тонкой известковой обмазке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенная графическая реконструкция северного флигеля, вне всякого сомнения, содержит ряд допущений, однако выявленный объем утраченной постройки, а также многочисленный архитектурный контекст, состоящий из хронологически, стилистически и типологически близких сооружений, дают основание рассматривать ее в качестве

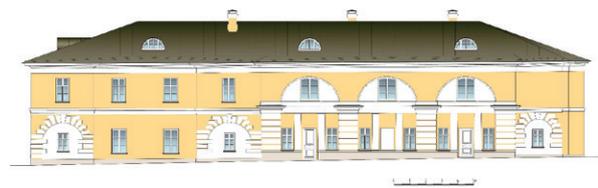


Рис. 16. Москва. Усадьба Мусиных-Пушкиных. Главный (северный) фасад северного флигеля по Спартаковской (Елоховской) улице. Графическая реконструкция на 2-й строительный период (вторая треть XIX в.) с архитектурным раскрытием части главного фасада на 1-й строительный период (первое десятилетие XIX в.). Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

Fig. 16. Moscow. The Musin-Pushkin estate. The main (northern) facade of the north wing in Spartakovskaya (Elokhovskaya) street. The graphic reconstruction of the 2nd construction period (the middle of the 19th century), including the architectural detailing of a fragment of the main facade that dates back to the 1st construction period (the first decade of the 19th century). Reconstructed by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU

наиболее приемлемого варианта восстановления данного сооружения.

Выбранная концепция позволит не только полноценно представить архитектурный облик

конкретного объекта, но и воссоздать часть исторического полотна застройки, что положительно отразится и на восприятии ансамбля в целом (рис. 17).



Рис. 17. Москва. Усадьба Мусиных-Пушкиных. Северный флигель с оградой по Спартаковской (Елоховской) улице. Графическая реконструкция на 2-й строительный период (вторая треть XIX в.) с архитектурным раскрытием части главного фасада на 1-й строительный период (первое десятилетие XIX в.). Реконструкция Т.В. Иванцыка. НИИП НИУ МГСУ

Fig. 17. Moscow. The Musin-Pushkin estate. The north wing and the fence along Spartakovskaya (Elokhovskaya) street. The graphic reconstruction of the 2nd construction period (the middle of the 19th century), including the architectural detailing of a fragment of the main facade, that dates back to the 1st construction period (the first decade of the 19th century). Reconstructed by T.V. Ivantsyk. NIIP NRU MGSU

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белицкий Я.М. Спартаковская улица, 2/1. М. : Моск. рабочий, 1986. С. 10–11.
2. Иванцык Т.В., Салимов А.М. Ограда усадьбы Мусиных-Пушкиных в Москве по материалам историко-архитектурных и натурных исследований // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 3. С. 265–278. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.265-278
3. ЦГА Москвы. Ф. 105. Оп. 1. Д. 635. Л. 3; ЦГА Москвы. Ф. 171. Оп. 1. Д. 281. Л. 2.
4. ЦГА Москвы. Ф. Т-1. Оп. 2. Д. 173 (437/291; 1). 1802–1804 гг.
5. ЦГА Москвы. Ф. 163. Оп. 5. Д. 18. 1814 г. Л. 22.
6. РГАДА. Ф. 1270. Оп. 1. Д. 756. 1813 г. Л. 9 об.
7. ЦГА Москвы. Ф. Т-1. Оп. 2. Д. 173 (437/291; 2). 1824 г.
8. Гулевич С. Историческая записка о 50-летию Московской 2-й гимназии... С. 4.
9. Гулевич С. Историческая записка о 50-летию Московской 2-й гимназии... С. 5.
10. ЦГА Москвы. Ф. 179. Оп. 63. Д. 739. 1914 г. Л. 1 об., 2–3.
11. ЦГА Москвы. Ф. 179. Оп. 47. Д. 535. Начало XX в.
12. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1719. 1958 г. Л. 6.
13. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1721. 1966 г. Л. 5, 7.
14. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1721. 1976 г. Л. 15–16.
15. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1721. 1966 г. Л. 5, 7.
16. ЦГА Москвы. Ф. Т-125. Оп. 4. Д. 1725. 1987 г. Л. 6–8.
17. Киселев И.А. Архитектурные детали в русском зодчестве XVIII–XIX веков : справочник архитектора-реставратора. М. : Academia, 2005. С. 219–220, 221–222.
18. Архив Мосводоканала. РКС № 2 СЭ № 2. Д. 636. Л. 2.
19. Ожегов С.С. Типовое и повторное строительство в России в XVIII–XIX веках. М. : Стройиздат, 1984. С. 85, 88, 91, 127.

Поступила в редакцию 8 февраля 2022 г.

Принята в доработанном виде 11 февраля 2022 г.

Одобрена для публикации 18 мая 2022 г.

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

Алексей Маратович Салимов — доктор искусствоведения, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), главный научный сотрудник; **Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства — филиал Центрального научно-исследовательского и проектного института Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (НИИТИАГ — филиал ЦНИИП Минстроя России)**; 111024, г. Москва, ул. Душинская, д. 9; РИНЦ ID: 428091; sampochta@mail.ru.

Вклад авторов:

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

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Belitsky Ya.M. *Spartakovskaya street, 2/1*. Moscow, Moskovsky Rabochiy, 1986; 10-11. (rus.).
2. Ivantsyk T.V., Salimov A.M. The fence of Musin-Pushkin estete in Moscow based on historical, architectural and field studies. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(3):265-278. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.3.265-278 (rus.).
3. *Moscow Central State Archive*. Fund 105. L. 1. File 635. Sheet 3; 3. *Moscow Central State Archive*. Fund 171. L. 1. File 281. Sheet 2. (rus.).
4. *Central State Archive of Moscow*. Fund T-1. L. 2. File 173 (437/291; 1). 1802–1804. (rus.).
5. *Moscow Central State Archive*. Fund 163. L. 5. File 18. 1814. Sheet 22. (rus.).
6. *Russian state archive of ancient documents*. Fund 1270. L. 1. File 756. 1813. Sheet 9 back. (rus.).
7. *Moscow Central State Archive*. Fund T-1. L. 2. File 173 (437/291; 2). 1824. (rus.).
8. Gulevich S. *Historical note about 50th anniversary of Moscow 2nd gymnasium...* Sheet 4. (rus.).
9. Gulevich S. *Historical note about 50th anniversary of Moscow 2nd gymnasium...* Sheet 5. (rus.).
10. *Moscow Central State Archive*. Fund 179. L. 63. File 739. 1914. Sheet 1 back, 2–3. (rus.).
11. *Moscow Central State Archive*. Fund 179. L. 47. File 535. Early 20th century. (rus.).
12. *Moscow Central State Archive*. Fund T-125. L. 4. File 1719. 1958. Sheet 6. (rus.).
13. *Moscow Central State Archive*. Fund T-125. L. 4. File 1721. 1966. Sheets 5, 7. (rus.).
14. *Moscow Central State Archive*. Fund T-125. L. 4. File 1721. 1976. Sheets 15-16. (rus.).
15. *Moscow Central State Archive*. Fund T-125. L. 4. File 1721. 1966. Sheets 5, 7. (rus.).
16. *Moscow Central State Archive*. Fund T-125. L. 4. File 1725. 1987. Sheets 6–8. (rus.).
17. Kiselev I.A. *Architectural details in Russian architecture of the 18th–19th centuries: Conservation Architect's Reference*. Moscow, Academia Publ., 2005; 219-220, 221-222. (rus.).
18. *Mosvodokanal Archive*. Sanitation District No. 2 Maintenance Service No. 2. File 636. L. 2. (rus.).
19. Ozhegov S.S. *Standart and repeated construction in Russia in XVIII–XIX centuries*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984; Sheets 85, 88, 91, 127. (rus.).

Received February 8, 2022.

Adopted in revised form on February 11, 2022.

Approved for publication on May 18, 2022.

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

Aleksey M. Salimov — Doctor of Arts, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN), Chief Researcher; **Scientific Research Institute of Theory and History of Architecture and Urban Planning — branch of the Central Institute for Research and Design of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (NIITIAG)**; 9 Dushinskay st., Moscow, 111024, Russian Federation; ID RISC: 428091; sampochta@mail.ru.

Contribution of the authors:

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

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК [711:004]:622.276(567)

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.559-568

Разработка градостроительной информационной системы населенных мест на территории нефтедобычи на примере округа Зубайр мухафазы Басра

Михаил Алексеевич Слепнев, Анвар Сабих Аль-катрани

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В округе Зубайр территории нефтедобычи (ТНД) характеризуются высокой степенью повреждения, граничат с жилыми и промышленными зонами, территориями водной поверхности, землями фермеров. Здесь расположено одно из крупнейших нефтяных месторождений мухафазы Басра. Округ Зубайр представляет собой важный источник для развития экономики страны и трудоустройства жителей Басры, а также других иракских мухафаз. Предложенная авторами программа по разработке градостроительной информационной системы на ТНД включает: сбор и обработку информации, наполнение базы данных (БД), анализ и обработку данных, создание геоэкологических базовых карт с использованием картографической системы ArcGis. Натурное наблюдение проводилось на площадях, где наблюдается деградация экосистемы. Исследование ориентировано на выявление потенциально пригодных территорий для проживания с последующей вариантной проработкой модели учета ТНД по трем проектным предложениям. Разработка нормативно-правового обеспечения на основе новых подходов, направленных на установление градостроительных регламентов, способствует решению поставленных задач сохранения экосистем, снижения антропогенных воздействий.

Материалы и методы. Используются стандартные измерительные и навигационные приборы, позволяющие получать информацию для формирования БД. Обработка данных выполнялась статистическими методами. Методика исследования включает пять этапов. Оценка территорий, пригодных для проживания, на которых производится или осуществлялась нефтедобыча, — главная задача исследования, решение которой может быть достигнуто с учетом разработки ряда критериев и мониторинга ТНД с последующим формированием градостроительной информационной системы.

Результаты. Разработанная и применяемая градостроительная информационная система направлена на оценку и создание благоприятной среды жизнедеятельности, обеспечивающей устойчивое развитие территории населенных мест в округе Зубайр мухафазы Басра Республики Ирак.

Выводы. Предложенный метод определения потенциально пригодных территорий для проживания, основанный на системе экологического картографирования, даст возможность повысить качество градостроительного планирования, улучшить состояние территорий нефтедобычи и обеспечить устойчивое территориальное развитие в целом. Для развития новых территорий необходима сформированная планировочная структура с учетом обеспечения требований к жилым зонам на территориях нефтедобычи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: градостроительная информационная система, ГИС-технология, территории нефтедобычи, территориальное планирование, устойчивое развитие, мухафаза Басра, округ Зубайр

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Слепнев М.А., Аль-катрани А.С. Разработка градостроительной информационной системы населенных мест на территории нефтедобычи на примере округа Зубайр мухафазы Басра // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 5. С. 559–568. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.559-568

Автор, ответственный за переписку: Анвар Сабих Аль-катрани, Alqtrany@yandex.ru.

Development of an urban planning information system for settlements located in oil production areas: the case of Al-Zubair district in Basra governorate

Mihail A. Slepnev, Anwar Sabeeh Al-qatrany

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

ABSTRACT

Introduction. Oil production areas are highly damaged in Al-Zubair district. However, they border residential and industrial zones, water areas, and farmlands. The local transport infrastructure demonstrates rapid growth. Al-Zubair district is also home to a largest oilfield in Basra governorate. The oilfield is an important factor of the country's economic development

and an employer for the residents of Basra and other Iraqi governorates. The programme, focused on the development of an urban planning information system, proposed by the authors for oil production areas, encompasses information gathering and processing, database provisioning, data analyzing and processing. The ArcGIS cartographic system will be used to make base maps of urban environments. Field studies have been conducted in the areas of environmental degradation, intervention and imbalance. The preparatory work included information gathering, photographing, and using GPS to determine the location of the areas under research. The purpose of the study is to identify the areas, that are potentially fit for human habitation, and analyze alternative inventory accounting models of oil production areas using three project proposals.

Materials and methods. Standard measuring instruments and navigation devices, such as Garmin GPS controller, were used to collect the information to be further added to the database and processed using statistical methods. GIS systems (Arc Map 10.3) and Microsoft excel were used to make digital maps; the remote sensing method and open data were also employed. A camera was used to make photos of particular objects. Firstly, the information was collected and added to the controller database, then it was forwarded to a computer system as vector data to make a digital map and develop design solutions.

Results. The purpose of the new urban planning information system is to assess the local living conditions and ensure the sustainable development of populated areas in the Al-Zubair district of Basra Governorate, the Republic of Iraq.

Conclusions. The proposed method of using an ecological mapping system to identify the areas potentially fit for human habitation will improve the quality of urban planning, enhance the environment in oil production areas and ensure their sustainable development. These areas need area development plans, that comply with the standards for residential areas located in oil production neighbourhoods.

KEYWORDS: urban planning information system, GIS technology, oil production areas, space planning, sustainable development, Basra governorate, Al-Zubair district

FOR CITATION: Slepnev M.A., Al-qatrani A.S. Development of an urban planning information system for settlements located in oil production areas: the case of Al-Zubair district in Basra governorate. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):559-568. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.559-568 (rus.).

Corresponding author: Anwar Sabeeh Al-qatrani, Alqtrany@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Война в заливе и экономическая блокада страны привели к снижению качества жизни и разрушению инфраструктуры Республики Ирак [1, 2]. Увеличение темпов урбанизации, развитие транспортной инфраструктуры, рост численности населения требуют особого внимания, направленного на формирование комфортных условий для проживания [2]. Добыча ресурсов происходит в нарушение установленных правил охраны окружающей среды, невыполнение которых ведет к загрязнению и невозможному использованию в будущем территорий для проживания и ведения хозяйственной деятельности.

В работе предложена градостроительная информационная система, ориентированная на оценку и обеспечение устойчивого развития территорий населенных мест, расположенных в границах территорий нефтедобычи (ТНД) [2, 3]. Принятая сегодня концепция во всех странах мира подразумевает формирование комфортной и безопасной среды жизнедеятельности человека. Одной из ее задач является создание и сохранение города и городских агломераций, обеспечивающих качество

городской среды, включая систему «зеленых» территорий, водных объектов, открытых пространств и территорий населенных пунктов. Ведение учета ТНД, которые непосредственно влияют на природную составляющую градоэкологического каркаса, служит обязательным условием [3]. Статус ТНД и объем добычи нефтепродуктов определяются законодательно на государственном уровне^{1, 2, 3} [4–7]. Отсутствие разработанных правовых документов, механизмов регулирования нефтедобычи, централизованной информационной системы приводит к нарушениям, связанным с использованием территорий, находящихся вблизи ТНД, а также невыполнению режимов, направленных на восстановление параметров окружающей среды [8]. Оценка территорий, пригодных для проживания, на которых производится или осуществлялась нефтедобыча, — главная задача исследования, решение которой может быть достигнуто с учетом разработки ряда критериев и мониторинга ТНД с последующим формированием градостроительной информационной системы. Выделение территории нефтедобычи в мухафазе Басра с помощью геоинформационной

¹ Statistical summary governorate Basra, Central statistical organization, 2018. Ministry of planning, Republic of Iraq (Статистический отчет мухафазы Басра. Центральная статистическая организация, 2018 г. Министерство планирования Республики Ирак). URL: <http://cosit.gov.iq/ar/1205-2019-11>

² Iraqi Federal Law, Council of Representatives. No. 21 in 2008 “Governorate Law on follow-up activities and development of plans in the governorate with assistance the specialized ministries” (Иракский Федеральный закон Совета представителей № 21 от 2008 «Закон мухафазы о последующей деятельности и разработке планов в мухафазе с помощью специализированных министерств»). URL: <http://www.alnoor.se>

³ Iraqi Federal Law. No. 27 in 2009 for protection and improvement environmental (Иракский Федеральный закон № 27 от 2009 «Об охране и улучшении окружающей среды»). URL: http://iraqld.hjc.iq/Law_result.aspx

системы (ГИС, Geographic Information Systems), спутниковой системы навигации (GPS — Global Positioning System) и дистанционного зондирования (ДЗ, Remote Sensing) — важный шаг процесса оценки нарушенных территорий в результате нефтедобычи [9–11].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использованы стандартные измерительные и навигационные приборы, позволяющие получать сведения для формирования базы данных (БД). Обработка информации проводилась статистическими методами с применением прикладного программного обеспечения геоинформационных систем ArcGIS и Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика исследования включает пять этапов.

Первый этап представляет собой сбор информации (векторные и растровые данные). На этой стадии определяется тип данных в системе:

- векторные данные (точка/линия/полигон с координатами X, Y);
- растровые данные (расширенный цифровой номер (DN), размер пикселя (Pixel), например, спутниковые сведения; аэрофотоснимки, сделанные с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

На втором этапе происходит формирование БД, осуществляется ввод и обеспечивается хранение информации (оцифровка) с помощью устройств ввода. Создание БД выполняется посредством Microsoft Excel. Работа с ГИС происходит с применением программной среды ArcMap и ArcCatalog в соответствии с концептуальной, логической и физической моделями.

Третий этап — это анализ информации, выполненный путем геопространственных инструментов, определение изображения изученной территории, классификация объектов и комбинация карт, представленных на этом этапе.

Четвертая фаза связана с обработкой данных. Этот этап позволяет обеспечить безопасный доступ к информации, включая обновление карты и данные о сторонних пользователях (users).

На пятом этапе происходит вывод результатов из БД. Информация может быть представлена в виде карт, таблиц и отчетов. Модель сбора, состава наполнения, хранения, анализа, обработки данных и вывода информации из БД представлена на рис. 1.

Подробно рассмотрена территория округа Зубайр, которая использована для проведения проектного эксперимента в качестве аналогового объекта. Объекты, размещенные на ТНД, могут быть классифицированы по трем группам: точечные, линейные, полигональные. Натурные обследования показали, что округ Зубайр содержит большое

количество техногенных и природных объектов. Классификация их по виду воздействия приведена на рис. 2. Природные объекты, например поверхностные воды и земли фермеров, отображаются в БД как полигональные. Дороги, нефтепроводы, газопроводы для транспортировки от нефтяных скважин к местам хранения или экспорта — как линейные объекты. Техногенная инфраструктура, например, нефтяные скважины, места для хранения нефти и газа в БД будут точечными объектами. Территории разработки нефтяных резервуаров (территории нефтедобычи) в БД выглядят как полигональные объекты. Жилые зоны, так же как полигональные объекты, поселки, отображаются как точечные объекты [12–14].

Информация о техногенных и природных объектах представляется в виде непространственных данных (атрибутивная информация).

Приведенная классификация объектов (рис. 3) разделена по назначению согласно трем ключевым группам, характеризующим обеспечение развития территории на основе экологически допустимых пределов: объекты, обеспечивающие баланс территорий; объекты, обеспечивающие экологию округа Зубайр; объекты, обеспечивающие права граждан.

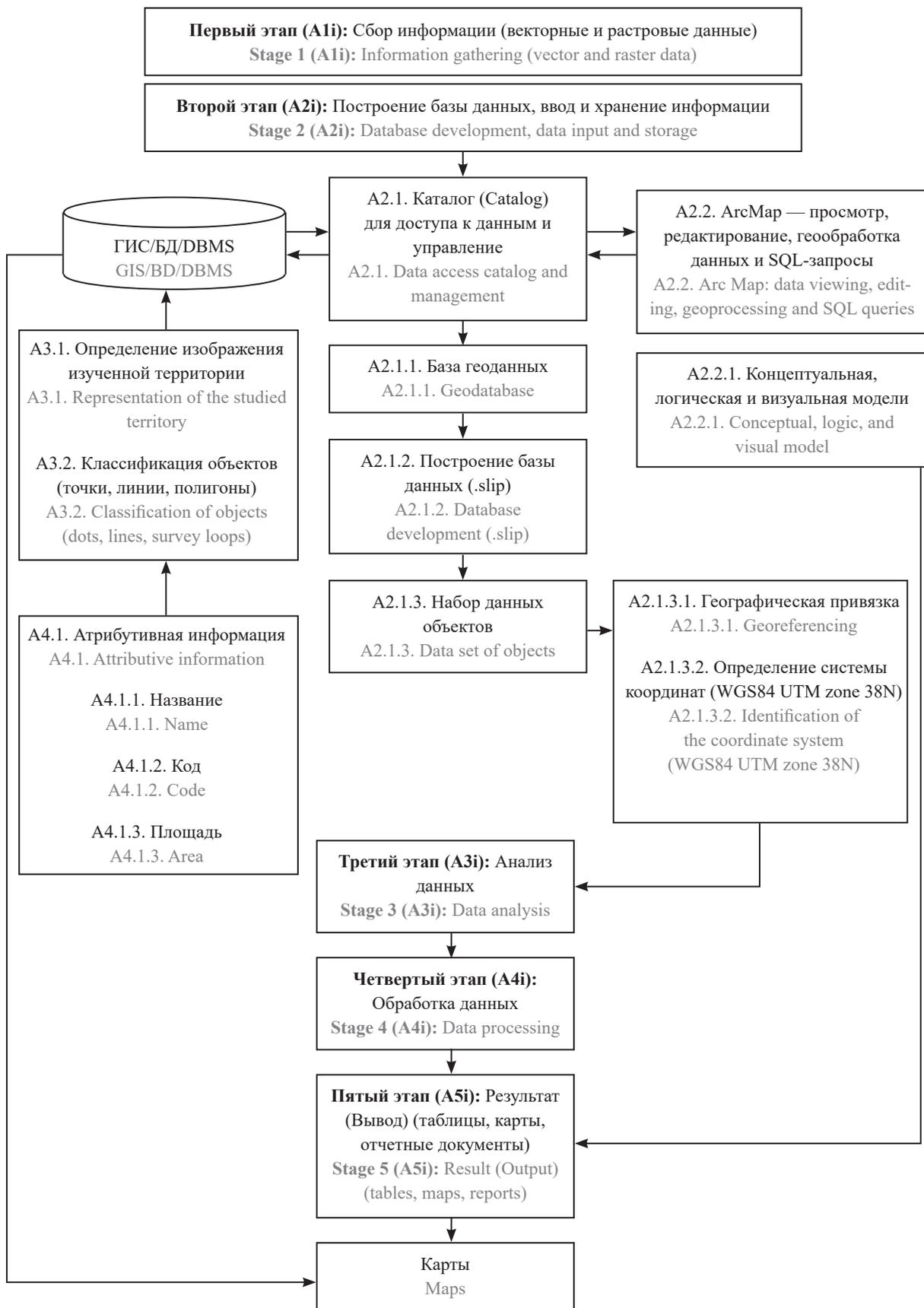
При размещении объектов должны применяться различные виды нормативно-правового обеспечения. Используя предложенную классификацию, возможно обеспечить построение БД объектов, выбор набора координат (X, Y), определение границ, фото, картографирование и др.

Методика системного учета ТНД должна включать два взаимосвязанных уровня: градостроительное планирование и градостроительное проектирование (подготовка проекта планировки). Главные положения методики системного учета ТНД показаны на рис. 4.

Округ Зубайр — один из важнейших в мухафазе Басра, включает три района: центральный район Зубайр, Юм касир и Сафан. Зубайр находится в 50 км от центра округа Басры. В Зубайре расположены важные нефтяные объекты [5, 15–17]. Общая территория округа Зубайр составляет 11 618 км². На территории размещены 10 крупных нефтяных месторождений: Румайла (Северная Румайла и Южная Румайла), Зубайр, Лухис, Суба, Сафан, Артави, Туба, Юм касир, Раджи, Гершан.

В данный момент только Южная Румайла, Зубир, Лухис, Суба, Артави и Туба являются работающими нефтяными месторождениями, остальные не работают. Нефтяное месторождение Зубайр — одно из крупнейших в мухафазе Басра и служит значимым источником для развития экономики страны и трудоустройства жителей Басры и других иракских мухафаз.

Проектный эксперимент выполнен на округ Зубайр. Расчетные значения получены с учетом



Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 17. Выпуск 5, 2022
 Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 17. Issue 5, 2022

Рис. 1. Модель сбора, состава и наполнения, хранения, анализа и обработки данных с выводом информации из БД
 Fig. 1. Flowchart showing data gathering, input, storage, analysis and processing and information extraction from the database

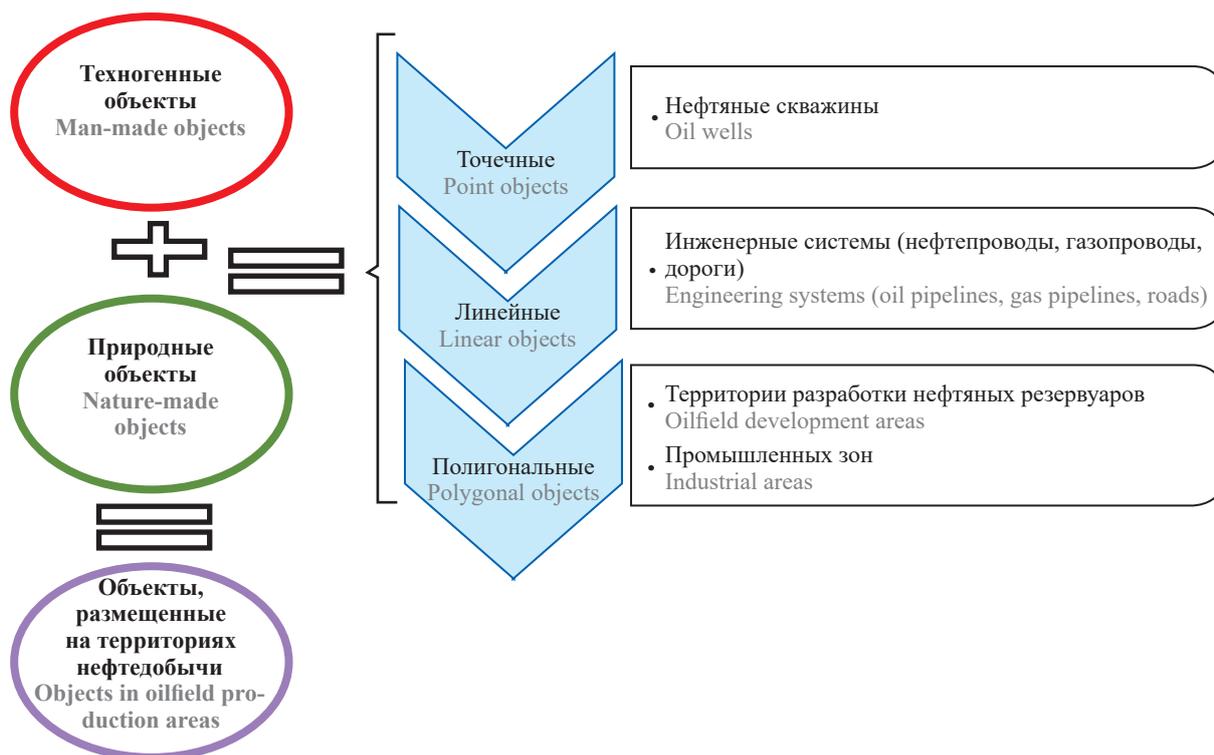


Рис. 2. Классификация объектов в округе Зубайр

Fig. 2. Classification of objects in Al-Zubair district



Рис. 3. Классификация территорий в округе Зубайр мухафазы Басра

Fig. 3. Terrain classification in Al-Zubair district of Basra governorate



Рис. 4. Основные положения предлагаемой методики системного учета территории нефтедобычи
 Fig. 4. Basic provisions of the proposed method for the systemic inventory accounting of oil production areas

использования основных градостроительных показателей, таких как: площадь территории, численность и плотность населения. Для расчета площади жилых территорий были применены следующие формулы:

$$S_{т.ж} = S_{сзз} + N, \tag{1}$$

$$S_{т.ж} = S_{сзз} + PS_{т}, \tag{2}$$

$$S_{т.ж} = S_{сзз} + (N/P), \tag{3}$$

где $S_{т.ж}$ — площадь жилых территорий; $S_{сзз}$ — площадь территории санитарной защиты (буфер); $S_{т}$ — общая площадь территории; N — численность жителей; P — плотность.

Первое вариантное предложение (плотность населения составляет 200 человек). Проектная площадь территорий населенных мест 247,6 км², вокруг которых расположена зона нефтяных скважин с буфером 1 км (рис. 5, а). Воздействие промышленной нагрузки возрастает в северной

части месторождения и постепенно уменьшается по направлению к южной части. Второе вариантное предложение характеризуется особым определением высокоэффективной территории с зоной протяженностью до 1000 м (рис. 5, *b*). В соответствии с третьим вариантным предложением (рис. 5, *c*) территория делится на три зоны: буферная зона, жилая и нефтяная зоны. Этот вариант достигается при условии компенсации со стороны государства фермерам-собственникам земель на ТНД месторождения Зубайр. Дело в том, что эти фермы на-

ходятся в границах территории нефтедобычи, которым наносится ущерб, особенно в южной части нефтяного месторождения. Оценка эффективности вариантных решений была проведена путем изучения следующих элементов: доступность транспорта на исследуемой территории, планировочная структура нефтяного месторождения и положение нефтяного месторождения в условиях градостроительной ситуации [12, 18–20]. Техничко-экономические показатели территорий нефтяного месторождения представлены в таблице.

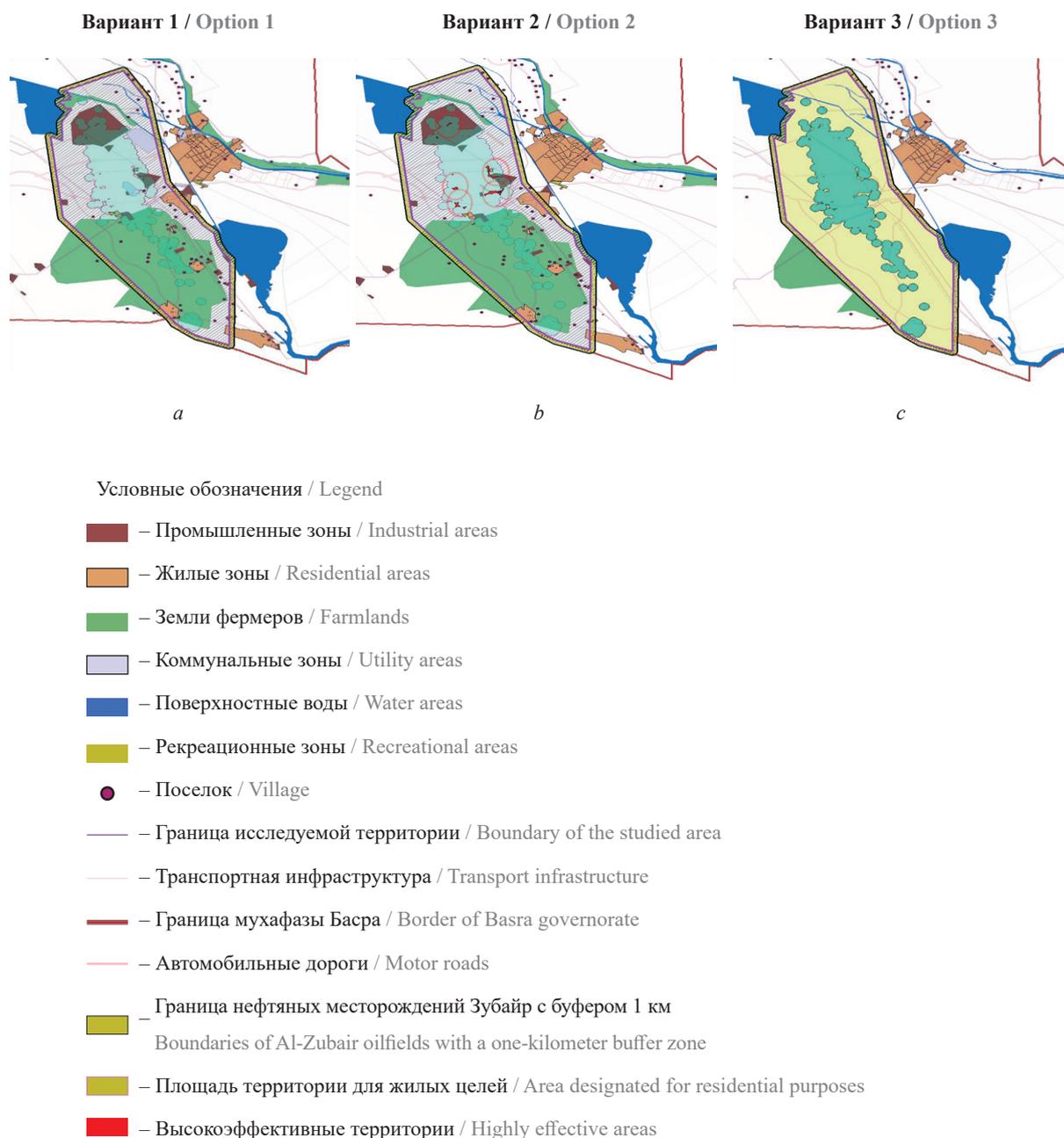


Рис. 5. Вариантная проработка проектного предложения на территории нефтяного месторождения Зубайр округа Зубайр: *a* — площадь территорий населенных мест 247,6 км²; *b* — площадь территорий населенных мест 287,9 км²; *c* — площадь территорий населенных мест 420,3 км²

Fig. 5. Alternative land use solutions for the area of Al-Zubair oilfield in Al-Zubair district: *a* — the populated area is 247.6 km²; *b* — the populated area is 287.9 km²; *c* — the populated area is 420.3 km²

Баланс территории нефтяного месторождения в округе Зубайр

Land use distribution for an oilfield in Al-Zubair district

Наименование / Type of area	Площадь, км ² / Area, km ²	Процент / Percent
Общая площадь нефтяного месторождения Зубайр Total area of Al-Zubair oilfield	1453,3	100
Нефтяные зоны Oil zones	391,9	27
Зона вокруг границы нефтяного месторождения Зубайр Zone surrounding the boundaries of Al-Zubair oilfield	279,7	19
Высокоэффективные территории Highly effective areas	5,3	0,4
Территории нефтедобычи Oil recovery areas	127	22,5
Транспортная инфраструктура Transport infrastructure	8,6	0,6
Рекреационные зоны Recreational areas	0,6	0,04
Земли фермеров Farmlands	142	8
Жилые территории 1 Residential areas 1	35	2,5
Жилые территории 2 Residential areas 2	282,6	19,5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные подходы к подготовке документации по территориальному планированию позволят обеспечить устойчивость осуществления градостроительной деятельности, а также устойчивость городских природных экосистем. Получен-

ные результаты можно использовать при разработке документов и правил в сфере градостроительного регулирования на федеральном уровне, что в свою очередь даст возможность разработать методы оценки социально-экономического влияния градостроительной деятельности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Slepnev M., Sherbena E., Al-qatrany A.C.D.* The use of smart remote sensing technologies in the development of master plans of cities on the example of the city of Basra // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Issue 2. P. 022013. DOI: 10.1088/1757-899X/869/2/022013

2. *Щербина Е.В., Белал А.А.* Особенности атрибутирования объектов исторических территорий городов, разрушенных войной // Жилищное строительство. 2020. № 4–5. С. 12–18. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-4-5-12-18

3. *Hussein Q.M.* Population growth in the province of Basrah, according to census projections in 2012 // Basra Research Journal of Human Sciences. 2017. No. 6/42.

4. *Saqer M.H., Al-Shahwan M., Al-Yasiri A.A.* The standard model of oil characteristics of Zubair reservoir in Luhais field southern Iraq — 2019 // Biochemical and Cellular Archives. 2019. Vol. 19. Issue 1. Pp. 1849–1855.

5. *Aljafar M., Al-Jafar, Al-Jaberi M.H.* Well logging and electrofacies of Zubair formation for upper

sandstone member in Zubair oil field, southern Iraq // Geological Journal. 2019. Vol. 52. Issue 1. Pp. 101–124.

6. *Hassan N.N.* Post-modernism in Iraqi planning experience // KnE Engineering. 2018. Vol. 3. Issue 4. P. 193. DOI: 10.18502/keg.v3i4.2169

7. *Jackson L.* The architecture of the British Mandate in Iraq: nation-building and state creation // The Journal of Architecture. 2016. Vol. 21. Issue 3. Pp. 375–417. DOI: 10.1080/13602365.2016.1179662

8. *Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н.* Грязевулканическая катастрофа в Индонезии // Бурение и нефть. 2017. № 11. С. 18–27.

9. *Sherbina E., Danilina N., Vlasov D.* City planning issues for sustainable development // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. Issue 22. Pp. 43131–43138.

10. *Shcherbina E., Gorbenkova E., Slepnev M.* Urban-planning sustainability problems in a city natural framework // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 106. P. 01032. DOI: 10.1051/mateconf/201710601032

11. *Теличенко В.И., Щербина Е.В.* Социально-природно-техногенная система устойчивой среды жизнедеятельности // Промышленное и граж-

данское строительство. 2019. № 6. С. 5–12. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.5-12

12. Щербина Е.В., Аль-катрани А.С., Слепнев М.А. Информационная модель землепользования для обеспечения сбалансированного развития территорий мухафазы Басра // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2021. № 1 (33). С. 51–62. DOI: 10.21869/2311-1518-2021-33-1-51-62

13. Belal A., Shcherbina E. Smart-technology in city planning of post-war cities // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 022043. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022043

14. Sherbena E.V., Slepnev M.A., Al-qatranly A.D. Features of urban planning information system for lands accounting of oil production territories of Iraq // Contemporary Problems of Architecture and Construction. 2021. Pp. 328–332. DOI: 10.1201/9781003176428-64

15. Шубенков М.В., Шубенкова М.Ю., Карташова К.К. Симбиотическое развитие урбанизированных и природных территорий // Архитектура и современные информационные технологии. 2019. № 4 (49). С. 215–223. DOI: 10.24411/1998-4839-2019-00015

16. Getis A., Ord J.K. Local spatial statistics: An overview // Spatial Analysis: Modeling in A GIS Environment, John Wiley & Sons, New York, 1996. P. 263.

17. Щербина Е.В. Развитие системы градостроительных регламентов для обеспечения устойчивого развития территорий // Евразийский союз ученых. 2015. № 5–6 (14). С. 166–168.

18. Щербина Е.В., Данилина Н.В., Маршалкович А.С. Научно-методические основы построения модуля «Проектирование устойчивой городской среды» в процессе обучения бакалавров и магистров по направлению «Градостроительство» // Экология урбанизированных территорий. 2015. № 1. С. 70–74.

19. Пануш П.С., Маршалкович А.С. Обеспечение экологической безопасности территории в процессе строительства и эксплуатации водных спортивных сооружений // Экология урбанизированных территорий. 2017. № 1. С. 62–68.

20. Алексеев Ю.В., Сомов Г.Ю. Предпроектная оценка градостроительно-инвестиционного потенциала сложившейся жилой застройки : монография. М. : НИУ МГСУ, 2015. С. 152.

Поступила в редакцию 18 апреля 2022 г.

Принята в доработанном виде 23 мая 2022 г.

Одобрена для публикации 23 мая 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: Михаил Алексеевич Слепнев — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 710075; SlepnevMA@mgsu.ru;

Анвар Сабах Аль-катрани — аспирант кафедры градостроительства; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1064703; Aqtrany@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Slepnev M., Sherbena E., Al-qatranly A.C.D. The use of smart remote sensing technologies in the development of master plans of cities on the example of the city of Basra. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 869(2):022013. DOI: 10.1088/1757-899X/869/2/022013

2. Shcherbina E.V., Belal A.A. Attribution features of sites in city's historical territories destroyed by war. *Housing Construction*. 2020; 4-5:12-18. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-4-5-12-18 (rus.).

3. Hussein Q.M. Population growth in the province of Basrah, according to census projections in 2012. *Basra Research Journal of Human Sciences*. 2017; 6/42.

4. Saqer M.H., Al-Shahwan M., Al-Yasiri A.A. The standard model of oil characteristics of Zubair re-

servoir in Luhais field southern Iraq — 2019. *Biochemical and Cellular Archives*. 2019; 19(1):1849-1855.

5. Aljafar M., Al-Jafar, Al-Jaberi M.H. Well logging and electrofacies of Zubair formation for upper sandstone member in Zubair oil field, southern Iraq. *Geological Journal*. 2019; 52(1):101-124.

6. Hassan N.N. Post-modernism in Iraqi planning experience. *KnE Engineering*. 2018; 3(4):193. DOI: 10.18502/keg.v3i4.2169

7. Jackson L. The architecture of the British Mandate in Iraq: nation-building and state creation. *The Journal of Architecture*. 2016; 21(3):375-417. DOI: 10.1080/13602365.2016.1179662

8. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Kargina T. Catastrophic mud volcano eruption in Indonesia. *Drilling and Oil*. 2017; 11:18-27. (rus.).

9. Sherbina E., Danilina N., Vlasov D. City planning issues for sustainable development. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015; 10(22):43131-43138.
10. Shcherbina E., Gorbenkova E., Slepnev M. Urban-planning sustainability problems in a city natural framework. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 106:01032. DOI: 10.1051/mateconf/201710601032
11. Telichenko V.I., Shcherbina E.V. Social-natural-technogenic system of sustainable environment of vital activity. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 6:5-12. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.06.5-12 (rus.).
12. Shcherbina E.V., Anwar S.A.-Q., Slepnev M.A. Land use information model to ensure balanced development for territories of Basra governorate. *Biosphere Compatibility: Human, Region, Technologies*. 2021; 1(33):51-62. DOI: 10.21869/2311-1518-2021-33-1-51-62 (rus.).
13. Belal A., Shcherbina E. 2018 Smart-technology in city planning of post-war cities. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:022043. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022043
14. Sherbena E.V., Slepnev M.A., Al-qatranly A.D. Features of urban planning information system for lands accounting of oil production territories of Iraq. *Contemporary Problems of Architecture and Construction*. 2021; 328-332. DOI: 10.1201/9781003176428-64
15. Shubenkov M., Shubenkova M., Kartashova K. Symbiotic development of urbanized and natural territories. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2019; 4(49):215-223. DOI: 10.24411/1998-4839-2019-00015 (rus.).
16. Getis A., Ord J.K. Local spatial statistics: An overview. *Spatial Analysis: Modeling in A GIS Environment*. New York, John Wiley & Sons, 1996; 263.
17. Shcherbina E.V. Development of the system of urban planning regulations for ensuring sustainable development of territories. *Eurasian Union of Scientists*. 2015; 5-6(14):166-168. (rus.).
18. Tscherbina E.V., Danilina N.V., Marshalkovich A.S. Scientifically-methodical bases of the building of the module “designing the sustainable town environment” in process of the education bachelor and master on direction “urban planning”. *Ecology of Urbanized Territories*. 2015; 1:70-74. (rus.).
19. Papush P.S., Marshalkovich A.S. Ensuring the environmental safety of the territory in the process of construction and operation of water sports facilities. *Ecology of Urbanized Territories*. 2017; 1:62-68. (rus.).
20. Alekseev Yu.V., Somov G.Yu. *Pre-project assessment of town-planning and investment potential of the existing residential development*. Moscow, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2015; 152. (rus.).

Received April 18, 2022.

Adopted in revised form on May 23, 2022.

Approved for publication on May 23, 2022.

B I O N O T E S: **Mihail A. Slepnev** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 710075; SlepnevMA@mgsu.ru;

Anwar Sabeeh Al-qatranly — postgraduate student of the Department of Urban Planning; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1064703; Alqtrany@yandex.ru.

Contribution of the authors:

All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare that there is no conflict of interest.

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

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.046.5 : 624.014

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.569-579

Надежность стального элемента при потере местной устойчивости стенки

Виталий Валерьевич Надольский

Белорусский национальный технический университет (БНТУ); г. Минск, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. В зданиях и сооружениях широко используются стальные тонкостенные конструкции в виде балок. Стальные балки с тонкими стенками привлекают своей эффективностью при работе на изгиб, однако для таких балок актуальным становится вопрос обеспечения местной устойчивости. Анализ моделей несущей способности сдвиговым и локальным нагрузкам, принятых в различных нормативных документах, показывает, что расчетные формулы в большинстве случаев сложны и имеют ограниченную область применения, при этом значения несущей способности, полученные по разным методикам, существенно отличаются.

Материалы и методы. Наиболее достоверно о точности и необходимых направлениях совершенствования модели несущей способности можно судить на основании анализа численных характеристик погрешности модели посредством сравнения с экспериментальными данными.

Результаты. Определены статистические характеристики погрешности модели несущей способности локальной нагрузке и модели несущей способности сдвигу. С учетом изменчивости базисных переменных и погрешности расчетной модели установлены значения коэффициентов надежности, обеспечивающие целевой уровень надежности.

Выводы. Показатели свидетельствуют о консерватизме рассматриваемой модели. Это в свою очередь подтверждает потребность развития метода проектирования на основании конечных элементов (КЭ) моделей несущей способности, позволяющего учесть конструктивные особенности рассматриваемого элемента и добиться более точных и универсальных решений, надежность которых обеспечивается унификацией требований к КЭ моделям с последующей верификацией их на основании экспериментальных данных и применения параметров надежности при проверках предельных состояний. Приведена методика определения значения коэффициента надежности для нелинейной модели несущей способности с учетом статистических характеристик базисных переменных, входящих в модель несущей способности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Еврокод, несущая способность при локальной нагрузке, несущая способность при сдвиге, погрешность, проектирование на основании КЭ моделей, коэффициент надежности

Благодарности. Автор выражает благодарность своим наставникам: профессорам Юрию Семеновичу Мартынову и Виктору Владимировичу Туру, а также анонимным рецензентам за конструктивные замечания и предложения.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Надольский В.В.* Надежность стального элемента при потере местной устойчивости стенки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 5. С. 569–579. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.569-579

Автор, ответственный за переписку: Виталий Валерьевич Надольский, Nadolskiyv@mail.by.

Reliability of a steel member in case of loss of local stability of a web

Vitali V. Nadolski

Belarusian National Technical University (BNTU); Minsk, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. Thin-walled steel beams are widely used in the construction of buildings and structures. Steel beams with thin webs are popular due to their efficient bending performance, although the issue of local stability becomes relevant. The analysis of models, simulating resistance to shear and local loading pursuant to various regulatory documents, shows that calculation formulas are complex in most cases and have a limited scope of application, while resistance values, obtained using different methods, are vastly different.

Materials and methods. The accuracy and essential areas of improvement of a resistance model can be identified by analyzing the numerical characteristics of model simulation uncertainties and comparing them with the experimental data.

Results. The author has identified statistical characteristics of the model uncertainty. Values of reliability factors, that ensure

the target level of reliability, are identified with account taken of the variability of basic variables and the uncertainty of resistance models.

Conclusions. These values are indicative of the conservative nature of the model under consideration, which confirms the need to develop a design method on the basis of FEs of models that will take account of design features of the member under consideration and ensure more accurate and universal solutions. Their reliability is guaranteed by unified requirements for FE models, followed by their verification by the experimental data and reliability parameters applied to check the limit states. The article also offers a method for identifying the value of the reliability factor for a nonlinear load-bearing model, taking into account the statistical characteristics of basic variables included into the resistance model.

KEYWORDS: Eurocode, patch loading resistance, shear resistance, uncertainty, design based on FE models, reliability coefficient

Acknowledgements: The author would like to thank his mentors, Professors Yuri Semenovich Martynov and Viktor Vladimirovich Tur, as well as anonymous reviewers for their constructive feedbacks and suggestions.

FOR CITATION: Nadolski V.V. Reliability of a steel member in case of loss of local stability of a web. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):569-579. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.569-579 (rus.).

Corresponding author: Vitali V. Nadolski, Nadolskivv@mail.by.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих зданиях и сооружениях широко используются стальные тонкостенные конструкции в виде балок. Стальные балки с тонкими стенками привлекают своей эффективностью с точки зрения снижения материалоемкости, при этом для них критическим становится вопрос обеспечения местной устойчивости стенки. Многие теоретические и экспериментальные работы посвящены изучению поведения и несущей способности таких балок, однако анализ моделей (расчетных зависимостей, формул) несущей способности при действии сдвиговых [1–5] и локальных нагрузок [6–10], принятых в различных нормативных документах, показывает, что расчетные формулы в большинстве случаев сложны и имеют ограниченную область применения, а также существенно отличаются значения несущей способности, полученные по разным методикам. Поэтому для дальнейшего анализа приняты модели несущей способности сдвигу и локальной нагрузки с учетом потери местной устойчивости в соответствии с Еврокодом¹. Наиболее достоверно о точности и необходимых направлениях совершенствования модели несущей способности можно судить по результатам анализа погрешности модели посредством сравнения с экспериментальными данными.

Кроме анализа погрешности модели несущей способности важной задачей служит последующий учет этой погрешности при проверке надежности зданий и сооружений. Учет погрешности модели осуществляется путем введения отдельной случайной величины в функцию предельного состояния. Численное описание статистических характеристик погрешности недостаточно освещено в литературе, и во многих случаях погрешность моделей игнорируется либо учитывается довольно условно [11]. Например, согласно Еврокоду¹, отсутствует диф-

ференциация значений коэффициентов надежности для разных моделей несущей способности и видов отказа. Это свидетельствует о том, что разные погрешности моделей не находят отражения при определении значений коэффициентов надежности. В отечественных документах хотя и отсутствовало математически строгое обоснование учета разной точности моделей несущей способности, однако этот факт отражен в регламентации коэффициентов условий работы².

На основе вышеотмеченных обстоятельств в настоящем исследовании выполнен анализ погрешности моделей несущей способности при проверках местной устойчивости в случае действия сдвиговых или локальных нагрузок на основании сравнения с экспериментальными данными. Также проанализированы статистические характеристики базисных переменных, входящих в модель несущей способности, на базе которых вычислены значения коэффициента надежности для модели несущей способности. Детальное рассмотрение теоретических предпосылок, положенных в основу моделей несущей способности локальной нагрузке и сдвигу, и сравнение с моделью несущей способности, принятой в СП², можно найти в работах [3] и [8].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Погрешность моделей несущей способности стальных конструкций определена статистическим методом вследствие сравнения с экспериментальными сведениями. С этой целью составлен банк экспериментальных данных испытаний стальных балок на действие локальной нагрузки [12–19]. Общее количество образцов составило 148. Параметры конструктивного исполнения тестируемых балок приведены в табл. 1. Для установления влияния параметров конструктивного исполнения

¹ EN 1993-1-5. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements. Brussels : European Committee for Standardization (CEN). 2006.

² СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Поправками, Изменениями 1, 2). М. : Стандартинформ, 2017.

на погрешность модели вычислен линейный коэффициент корреляции (или коэффициент корреляции Пирсона) ρ , который отражает статистическую взаимосвязь погрешности модели и рассматриваемой переменной (см. табл. 1).

На рис. 1 представлены гистограммы распределения значений параметров образцов. Из гистограмм видно, что выборка является представительной для большинства практических случаев исполнения балок.

Анализ параметров конструктивного исполнения тестируемых балок свидетельствует о том,

что большинство образцов ($n = 141$) выполнено из стали с пределом текучести в диапазоне от 205 до 422 МПа, что соответствует наиболее распространенным маркам стального проката. Исключение образцов ($n = 7$) с пределом текучести 830–832 МПа из выборки данных практически не влияет на статистические характеристики погрешности модели. Большая часть образцов ($n = 112$) изготовлена с отношением расстояния между ребрами жесткости к высоте стенки a/h_w в интервале от 0,9 до 3,1, что также соответствует отечественной практике проектирования. Более половины образцов ($n = 104$) вы-

Табл. 1. Параметры конструктивного исполнения тестируемых балок на действие локальной нагрузки

Table 1. Structural design parameters of tested beams subjected to patch loading

Параметры Parameters	Мин Min	Макс Max	ρ
Высота стенки h_w , мм Web height h_w , mm	239,8	1274	0,163
Толщина стенки t_w , мм Web thickness t_w , mm	2,0	9,95	-0,147
h_w/t_w Ratio of web height h_w to web thickness t_w	50,25	400,0	0,339
Расстояние между ребрами жесткости a , мм Distance between stiffening ribs a , mm	400	9400	0,248
Отношение расстояния между ребрами жесткости a к высоте стенки h_w Ratio of the distance between stiffening ribs a to web height h_w	0,75	13,4	0,204
Ширина приложения локальной нагрузки s_s , мм Patch loading width s_s , mm	0	280	0,027
s_s/h_w	0	0,4	-0,134
s_s/a	0	0,14	-0,081
Ширина полки b_f , мм Flange width b_f , mm	45,0	300,0	0,281
Толщина полки t_f , мм Flange thickness t_f , mm	3,05	40,0	0,434
Предел текучести стали для стенки f_{yw} , МПа Steel yield limit of a web f_{yw} , MPa	205	832	0,095
Предел текучести стали для полок f_{yf} , МПа Steel yield limit of flanges f_{yf} , MPa	221	844	0,005
Условная гибкость стенки балки при проверке несущей способности согласно EN 1993-1-5 $\bar{\lambda}_F$ Provisional flexibility of a beam web in the course of checking the bearing capacity pursuant to EN 1993-1-5 $\bar{\lambda}_F$	0,35	4,78	0,496
Условная гибкость стенки балки согласно СП 16.13330.2017 $\bar{\lambda}_{w,CP}$ Provisional flexibility of a beam web pursuant to Construction regulations 16.13330.2017 $\bar{\lambda}_{w,CR}$	1,74	15,24	0,401

полнены с отношением длины приложения нагрузки на пояс к высоте стенки s_s/h_w равным 0,05–0,2. Семь образцов испытаны на условно сосредоточенную силу с отношением s_s/h_w равным нулю (исключение этих образцов из выборки данных практиче-

ски не влияет на статистические характеристики погрешности модели).

Для оценки погрешности модели несущей способности сдвигу стального элемента составлен банк экспериментальных данных [20]. Первые итоги анали-

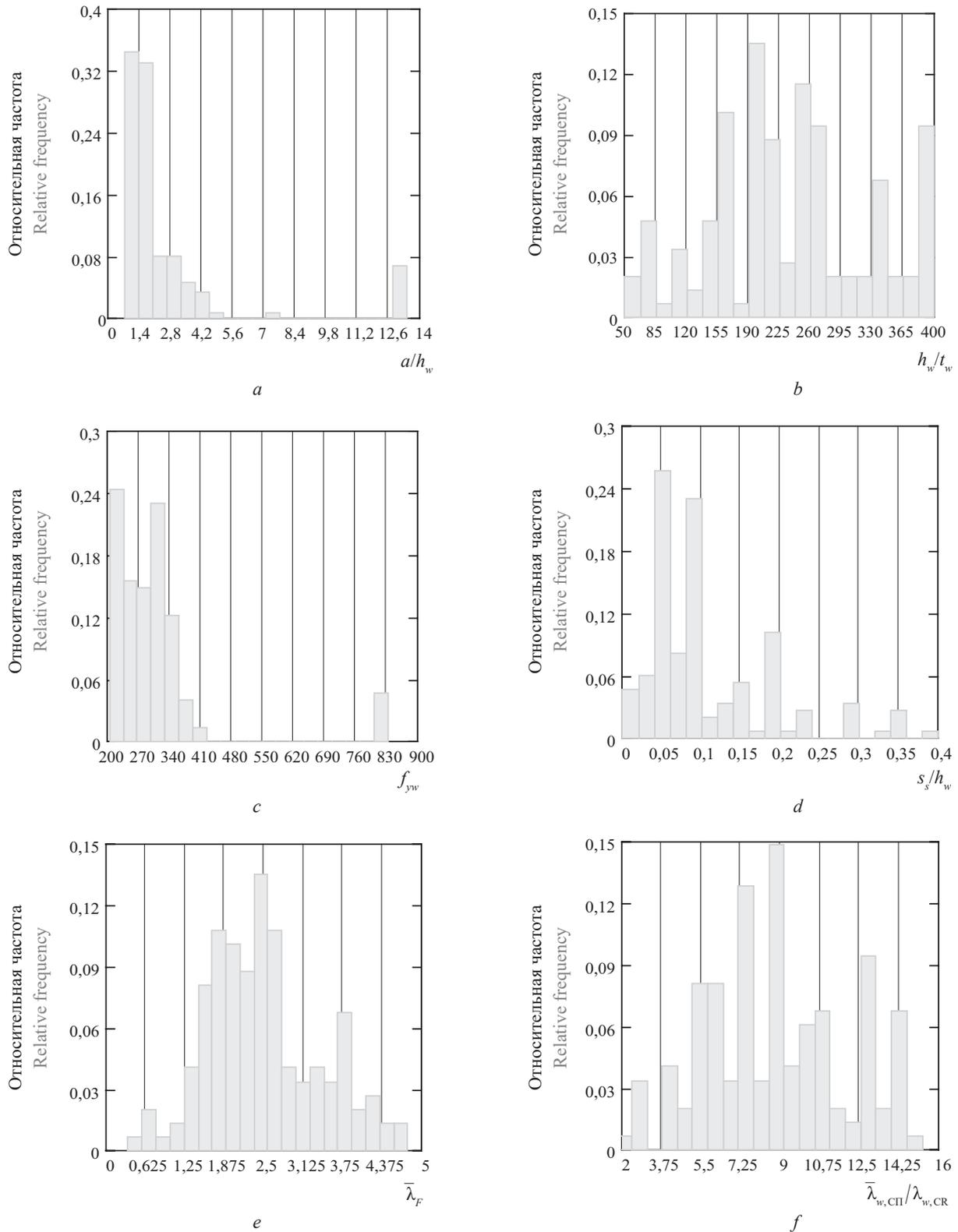


Рис. 1. Гистограммы распределения значений параметров образцов

Fig. 1. Histograms describing the distribution of parameter values of specimens

за погрешности моделей несущей способности сдвигу на основании первоначальной выборки, состоящей из 165 результатов экспериментальных исследований, представлены в труде [21]. В настоящей статье проведен анализ расширенной базы данных, в которую вошли 210 результатов экспериментальных исследований несущей способности сдвигу. Этот анализ учитывает более широкие диапазоны параметров исполнения образцов и демонстрирует зависимость погрешности модели несущей способности от объема базы экспериментальных данных (снижается статистическая неопределенность). Общее количество образцов, пригодных для обработки, составило 188.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа погрешности модели несущей способности принят следующий формат записи:

$$K_R = R(X, Y)/r(X_i), \quad (1)$$

где K_R — случайная переменная, характеризующая погрешность (неопределенность) модели несущей способности; $R(X, Y)$ — значение несущей способности, полученное в результате испытаний; X — переменные, входящие в модель несущей способности; Y — переменные, влияние которых незначительно или не учитывается в модели несущей способности; $r(X_i)$ — значение несущей способности, полученное по модели с использованием измеренных значений базисных переменных.

На рис. 2–5 показаны графики зависимости погрешности модели несущей способности стальных конструкций локальным воздействиям от основных параметров исполнения образцов. На вертикальной оси отображены значения погрешности модели несущей способности (т.е. отношение эксперименталь-

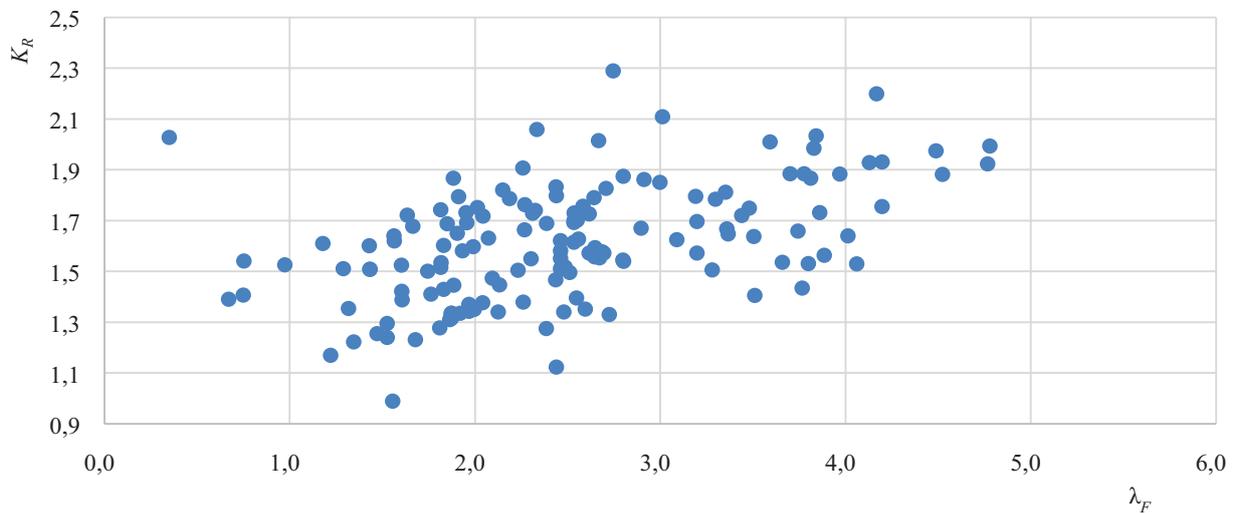


Рис. 2. Зависимость $K_R - \lambda_F$

Fig. 2. $K_R - \lambda_F$ dependency

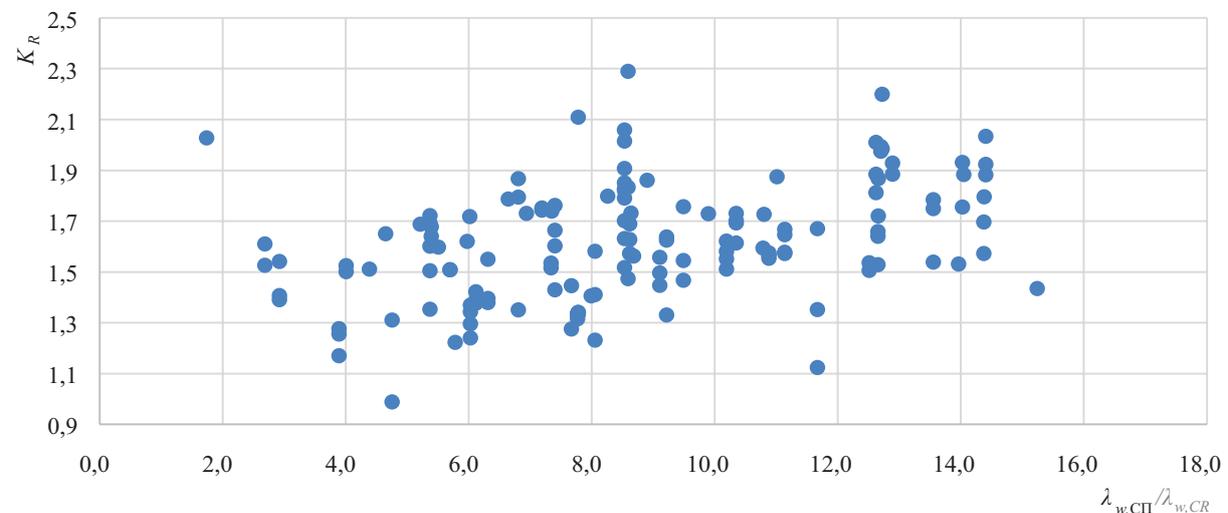


Рис. 3. Зависимость $K_R - \lambda_{w,CP}$

Fig. 3. $K_R - \lambda_{w,CR}$ dependency

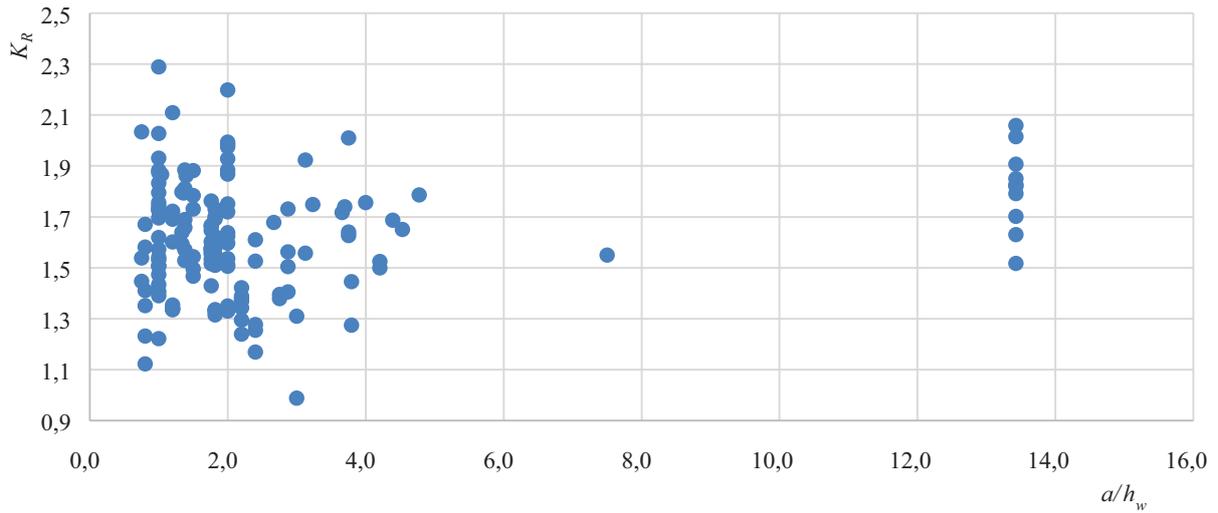


Рис. 4. Зависимость $K_R - a/h_w$

Fig. 4. $K_R - a/h_w$ dependency

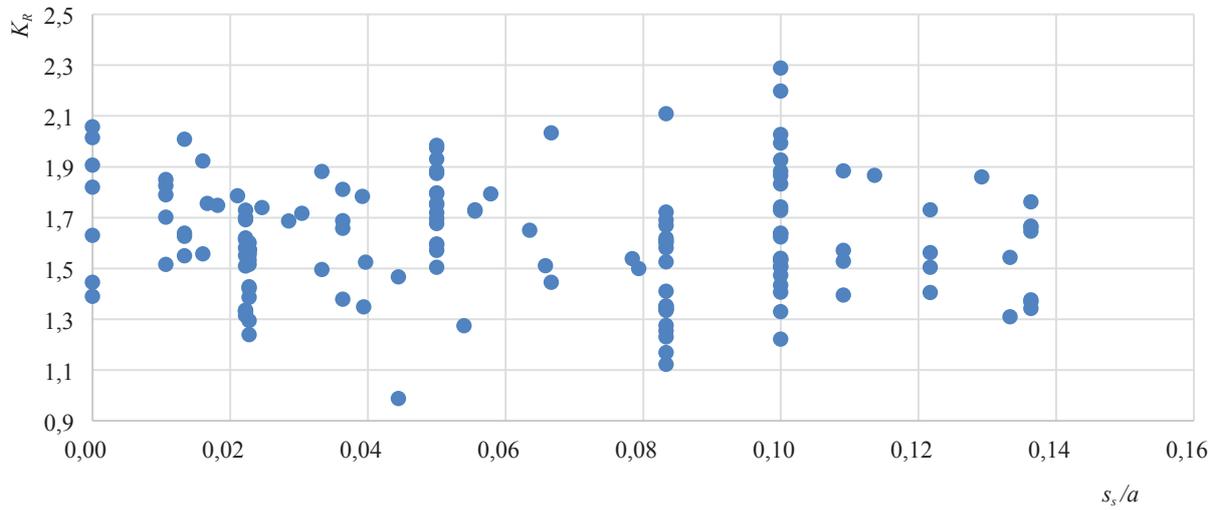


Рис. 5. Зависимость $K_R - s/a$

Fig. 5. $K_R - s/a$ dependency

Табл. 2. Погрешность модели несущей способности локальной нагрузки для разных подвыборок экспериментальных данных

Table 2. Uncertainty of the model of resistance to patch loading for different sub-samplings of experimental data

$\bar{\lambda}_F$	$\frac{\bar{\lambda}_{w^2}^{сп}}{\lambda_{w^2}^{CR}}$	h_w/t_w	a/h_w	n	$K_{R^2} \min$	$K_{R^2} \max$	μ_{KR}	$V_{KR^2} \%$
1,2–4,0	2,7–15,2	63–400	0,75–13,4	133	0,99	2,29	1,60	13,6
0,35–2,2	1,7–6,0	50–166	1–4,5	28	0,99	2,03	1,50	13,8
1,52–4,8	6,0–14,4	94–400	0,75–13,4	119	1,12	2,29	1,64	13,6
0,35–3,5	1,7–8,0	50–200	1–7,5	60	0,99	2,03	1,50	13,0
1,68–4,8	7,8–15,2	207–400	0,75–13,4	88	1,12	2,29	1,69	12,8
0,35–4,8	1,7–15,2	50–400	0,75–2,4	112	1,12	2,29	1,60	14,1
1,55–4,8	4,0–14,4	63–400	2,67–4,8	25	0,99	2,01	1,58	13,9
Вся выборка Total sampling	–	–	–	148	0,99	2,29	1,61	14,0

ного значения несущей способности к значению, вычисленному по расчетной зависимости (модели) при измеренных значениях переменных), на горизонтальной оси представлены переменные (обозначения см. табл. 1), оказывающие влияние на значение несущей способности локальной нагрузке. Анализируя данные графиков, можно сделать вывод, что большинство опытных образцов изготовлено с равномерными параметрами, за исключением отношения расстояния между ребрами жесткости к высоте стенки.

Погрешность модели несущей способности была вычислена для диапазонов значений условной гибкости. В табл. 2 представлены среднее значение и коэффициент вариации погрешности модели. Модель несущей способности, принятая в EN¹, позволяет определить несущую способность локальному воздействию при условной гибкости $\lambda_{w,CP}$ более шести, в отличие от СП². При этом следует отметить, что при значениях условной гибкости $\lambda_{w,CP}$ более шести погрешность модели несущей способности изменяется незначительно. Дополнительно проанализирована зависимость погрешности модели несущей способности от отношения h_w/t_w и отношения a/h_w .

Для подтверждения полученных результатов осуществлен обзор работ, направленных на исследование погрешности модели несущей способности при локальной нагрузке. Обзор литературы показал, что затруднительно найти анализ погрешности модели на базе обширного количества данных. В большинстве случаев авторы рассматривают точность предложенных ими моделей несущей способности на ограниченном количестве данных. Из значимых работ по анализу погрешности модели несущей способности сдвигу стоит отметить публикацию [14], в которой проанализирована точность различных моделей несущей способности локальной нагрузки. Согласно данным [14] для погрешности модели, принятой в документе¹, среднее значение составляет 1,63 и коэффициент вариации 18,3 %. Стоит также отметить анализ точности моделей несущей способности локальной нагрузке [22]. Статистические характеристики представлены для немного моди-

фицированных моделей по отношению к модели, принятой в Еврокоде¹, однако данные будут полезны для сравнительного анализа. Так, согласно работе [22], среднее значение погрешности составляет 1,5, стандартное отклонение — 0,27.

В табл. 3 приведены среднее значение и коэффициент вариации случайной величины, характеризующей погрешность модели несущей способности при доминирующем действии сдвига. Увеличение базы данных по отношению к первоначальному исследованию [21] позволило дополнить и расширить область анализируемых параметров модели несущей способности, но существенного изменения погрешности модели несущей способности не произошло. Для всей выборки (количество образцов 188) из новой базы экспериментальных сведений среднее значение и коэффициент вариации погрешности модели несущей способности равны 1,19 и 18 % соответственно. При этом для всей выборки (количество образцов 110) из первоначальной базы [21] среднее значение и коэффициент вариации составляют 1,24 и 17 % соответственно. Увеличение количества экспериментальных данных также незначительно повлияло на статистические характеристики погрешности модели в подвыборках, за исключением подвыборки с малой гибкостью стенки $\lambda_{w,EN} < 1,08$. Для этой подвыборки произошло изменение среднего значения с 1,1 (первоначальная выборка $n = 10$) до 1,04 (новая выборка $n = 19$), коэффициента вариации с 6 до 20 %.

При проверках предельных состояний учет погрешности модели и изменчивости базисных переменных выполняется с помощью коэффициентов надежности. Под базисными переменными подразумеваются случайные величины, влияющие на значение несущей способности. Для стальных конструкций, как правило, основной базисной переменной выступает предел текучести, однако для рассматриваемых тонкостенных элементов, безусловно, дополнительно будет оказывать воздействие изменчивости толщины стенки балки. Коэффициент надежности γ_M для модели несущей способности

Табл. 3. Погрешность модели несущей способности сдвигу для разных подвыборок экспериментальных данных

Table 3. Uncertainty of the model of resistance to shear for different sub-samplings of experimental data

$\bar{\lambda}_{w,EN}$	$\frac{\bar{\lambda}_{w,CP}}{\bar{\lambda}_{w,CR}}$	a/h_w	n	$K_{R, min}$	$K_{R, max}$	μ_{KR}	$V_{KR}, \%$
0,52–1,04	1,6–7,0	0,33–5,51	19	0,56	1,43	1,04	20
1,16–1,99	3,4–9,1	0,5–5,54	44	0,93	1,36	1,1	10
2,02–2,99	6,8–11,3	0,8–13,5	80	0,7	1,6	1,18	16
3,09–3,98	9,2–14,0	0,98–15,0	30	0,96	1,85	1,29	16
4,4–7,3	14,7–25,9	0,63–3,0	15	1,01	1,75	1,52	12
Вся выборка Total sampling	1,6–25,9	0,33–15,0	188	0,56	1,85	1,19	18

можно выразить через нормативное R_{XK} и расчетное значение R_d несущей способности [23]:

$$\gamma_M = R_{XK}/R_d, \quad (2)$$

где R_{XK} — значение несущей способности, вычисленное при нормативных значениях базисных переменных; R_d — расчетное значение несущей способности.

Расчетное значение несущей способности возможно определить как заданную квантиль статистического распределения значений несущей способности. Значения базисных переменных X_i сгенерированы посредством метода Монте-Карло. На основании сгенерированной выборки значений переменных вычислены значения несущей способности и далее для выборки значений несущей способности установлено расчетное значение как квантиль распределения. Для определения расчетного значения R_d принят квантиль $1,18 \cdot 10^{-3}$ на основании значения коэффициентов чувствительности α_R и целевое значение индекса надежности β , рекомендованных согласно строительным нормам³. Количество симуляций для каждой базисной переменной, и соответственно, для выборки значений несущей способности, составило 10^5 .

В качестве базисных переменных для рассматриваемых моделей несущей способности приняты погрешность модели, предел текучести и толщина стенки. Отношение среднего значения предела текучести к нормативному μ_{fy}/f_y принято равным 1,15, а коэффициент вариации $V_{fy} = 7\%$ [24]. С целью вероятностного описания изменчивости стенки балки принято нормальное распределение со статистическими характеристиками $\mu_x/X_n = 1,0$, $V = 2\%$ ⁴. Для ширины проката, т.е. для высоты и ширины полок, изменчивостью можно пренебречь для большинства практических размеров профилей. Для описания погрешности модели несущей способности принят логнормальный закон распределения со следующими статистическими характеристиками для:

- локальной нагрузки при полной выборке экспериментальных данных $\mu_{KR} = 1,6$ и $V_{KR} = 14\%$;
- локальной нагрузки при отношении h_w/t_w до 200 $\mu_{KR} = 1,5$ и $V_{KR} = 13\%$;
- сдвига при полной выборке экспериментальных данных $\mu_{KR} = 1,18$ и $V_{KR} = 16\%$;
- сдвига при условной гибкости $\bar{\lambda}_w$, СП до 6 $\mu_{KR} = 1,12$ и $V_{KR} = 12\%$;
- сдвига при отношении a/h_w около 1,0 $\mu_{KR} = 1,24$ и $V_{KR} = 13\%$.

На основании сгенерированной выборки значений несущей способности вычислены значения коэффициентов надежности для разных параметров погрешности модели несущей способности. Результаты представлены в табл. 4.

Табл. 4. Значения коэффициента надежности

Table 4. Values of the reliability factor

μ_{KR}	$V_{KR}, \%$	γ_M	μ_R/R_{XK}	$V_R, \%$
1,6	14	0,92	1,74	15
1,5	13	0,95	1,63	14
1,18	16	1,32	1,28	17
1,12	12	1,24	1,22	13
1,24	13	1,14	1,35	14

Примечание: μ_R/R_{XK} — отношение математического ожидания измеренных значений к несущей способности, вычисленное при нормативных значениях базисных переменных; V_R — коэффициент вариации.

Note: μ_R/R_{XK} is the ratio of the mean value of the experimental load-bearing capacity to the bearing capacity, calculated using standard values of basic variables; V_R is the coefficient of variation.

Распределение сгенерированных значений несущей способности хорошо соответствует логнормальному распределению. Расчетные значения несущей способности, вычисленные с помощью логнормального распределения (статистические характеристики приняты для сгенерированной выборки) и на основании симуляционного метода, не отличаются более чем на один процент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

- Модели (расчетные формулы, зависимости) несущей способности стальных элементов при проверках местной устойчивости в большинстве случаев сложны и имеют ограниченную область применения, а также существенно отличаются значения несущей способности, полученные по разным моделям [3, 8]. В нормативных документах СП² и EN¹ отсутствует проверка на совместное действие сдвиговых и локальных нагрузок с учетом критической стадии работы отсека. Существуют исследования по решению этого вопроса [25, 26], однако из-за сложности моделей и их недостаточной экспериментальной подверженности эти исследования так и не нашли отражения в нормативных документах.

- Модель несущей способности, принятая в EN¹, позволяет вычислить несущую способность локальному воздействию при условной гибкости более 6, в отличие от СП². При этом погрешность модели несущей способности изменяется несущественно.

³ СН 2.01.01-2019. Основы проектирования строительных конструкций : введ. 08.09.20. Минск : Минстройархитектуры, 2020. 83 с.

⁴ JCSS Probabilistic Model Code // Joint Committee of Structural Safety. 2001.

- Погрешность модели несущей способности локальному воздействию не имеет корреляционной связи с параметрами образцов, разбиение на подвыборки не привело к существенным изменениям погрешности модели. Среднее значение и коэффициент вариации для погрешности модели равны 1,6 и 14 % соответственно. Данные показатели говорят о консерватизме рассматриваемой модели.

- Погрешность модели несущей способности сдвигу имеет среднее значение 1,18 и коэффициент вариации 16 %, а при условной гибкости $\bar{\lambda}_{w,sp}$ до 6 (что хорошо отражает типовые решения, применяемые при строительстве зданий и сооружений) — среднее значение 1,12 и коэффициент вариации 12 %. Увеличение базы данных по отношению к первоначальному исследованию позволило дополнить и расширить область анализируемых параметров модели несущей способности, однако значительного изменения погрешности модели несущей способности не произошло, что говорит о достаточной стабильности представленных результатов. Уменьшение погрешности моделирования может быть достигнуто также за счет дифференциации параметров применимости модели.

На основании симуляционного метода определены значения коэффициента надежности, применяемые к модели несущей способности с учетом целевого индекса надежности. Значения коэффициента надежности для разных параметров погрешности

модели находятся в диапазоне 1,15–1,3 для модели несущей способности сдвигу и 0,92–0,95 для модели несущей способности локальной нагрузке. При этом рекомендованное значение коэффициента надежности, согласно Еврокоду, составляет 1,0, что вызывает обеспокоенность в отношении справедливости применения этого значения. Следует отметить, что расчетное значение установлено как квантиль распределения, поэтому более точным и корректным является определение коэффициента надежности на основании целевого индекса надежности для функции состояния с использованием вероятностного метода, что станет темой будущих исследований [27].

Вышеописанные факты (различие моделей несущей способности, отсутствие проверок на совместное действие сдвиговых и локальных нагрузок, высокий консерватизм модели несущей способности локальной нагрузке) подтверждают необходимость развития метода проектирования на основе конечных элементов (КЭ) моделей несущей способности, позволяющего учесть эти факты и добиться более точных и универсальных решений, надежность которых обеспечивается унификацией требований к КЭ моделей с последующей верификацией их на основании экспериментальных данных и применения параметров надежности при проверках предельных состояний [28].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Glassman J.D., Garlock M.E.M.* A compression model for ultimate postbuckling shear strength // *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 102. Pp. 258–272. DOI: 10.1016/j.tws.2016.01.016
2. *Graciano C., Ayestarán A.* Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear // *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 80. Pp. 202–212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018
3. *Мартынов Ю.С., Лагун Ю.И., Надольский В.В.* Модели сопротивления сдвигу стальных элементов, учитывающие потерю местной устойчивости стенки // *Металлические конструкции*. 2012. Т. 18. № 2. С. 111–122.
4. *Hingnekar D.R., Vyavahare A.Y.* Mechanics of shear resistance in steel plate girder: critical review // *Journal of Structural Engineering*. 2020. Vol. 146. Issue 6. P. 03120001. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002484
5. *Sinur F., Beg D.* Moment–shear interaction of stiffened plate girders — Tests and numerical model verification // *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 85. Pp. 116–129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007
6. *Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R.* Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research // *Journal of Constructional Steel*

Research. 2019. Vol. 158. Pp. 213–229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025

7. *Chacon R., Serrat M., Real E.* The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading // *Thin-Walled Structures*. 2012. Vol. 53. Pp. 15–25. DOI: 10.1016/j.tws.2011.12.003

8. *Надольский В.В.* Анализ расчетных моделей сопротивления локальной нагрузке стальных элементов // *Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура*. 2016. № 1 (97). С. 167–171.

9. *Rogač M., Aleksić S., Lučić D.* Influence of patch load length on resistance of I-girders. Part-II: Numerical research // *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. Vol. 176. P. 106388. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106388

10. *Каледин В.О., Суханов А.В., Сисаурри В.И., Левина Е.А.* Жесткость и несущая способность композиционной балки мостового покрытия // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2006. № 1. С. 370–380.

11. *Nadolski V., Sykora M.* Model uncertainties in resistances of steel members // *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems*. 2015. Pp. 4189–4195. DOI: 10.1201/b19094-548

12. Roberts T.M., Rockey K.C. Method pour predire la charge de ruine d'une poutre a ame mince soumise a une charge simi-repartie dans le plan de l'ame // Construction Metallique. 1978. Vol. 3. Pp. 3–13.

13. Roberts T.M., Rockey K.C. A mechanism solution for predicting the collapse loads of slender plate girders when subjected to in-plane patch loading // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1979. Vol. 67. Issue 1. Pp. 155–175. DOI: 10.1680/iicp.1979.2322

14. Gozzi J. Patch loading resistance of plated girders: Ultimate and serviceability limit state : Doctoral Thesis. Sweden : Luleå University of Technology, 2007.

15. Roberts T.M., Chong C.K. Collapse of plate girders under edge loading // Journal of the Structural Division. 1981. Vol. 107. Issue 8. Pp. 1503–1509. DOI: 10.1061/jsdeag.0005762

16. Johansson B., Lagerqvist O. Resistance of plate edges to concentrated forces // Journal of Constructional Steel Research. 1995. Vol. 32. Issue 1. Pp. 69–105. DOI: 10.1016/0143-974x(94)00010-f

17. Lagerqvist O. Patch loading resistance of steel girders subjected to concentrated forces : Doctoral Thesis. Sweden : Luleå University of Technology, 1995.

18. Shimizu S., Yabana H., Yoshida S. A new collapse model for patch-loaded web plates // Journal of Constructional Steel Research. 1989. Vol. 13. Issue 1. Pp. 61–73. DOI: 10.1016/0143-974x(89)90005-9

19. Bergfelt A. Girder web stiffening for patch loading. Chalmers University of Technology, Dept. of Structural Engineering, Div. of Steel and Timber Structures, publ. S 83:1. Geteborg, 1983.

20. Надольский В.В. Параметры конструкционной надежности для проверок изгибаемых стальных элементов по предельным состояниям несущей способности : дис. ... канд. техн. наук. Брест : Брестский государственный технический университет, 2015.

21. Надольский В.В., Мартынов Ю.С. Оценка ошибок моделей сопротивления сдвигу, принятых в EN 1993-1-5 и СНиП II-23 // Вестник МГСУ. 2013. № 5. С. 7–20. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.5.7-20

22. Flores R. Resistance of transversally stiffened hybrid steel plate girders to concentrated loads : Doctoral Thesis. Barcelona : Polytechnic University of Catalonia, 2009. 221 p.

23. Тур В.В., Надольский В.В. Калибровка значений частных коэффициентов для проверок предельных состояний несущей способности стальных конструкций для условий Республики Беларусь. Часть 2 // Строительство и реконструкция. 2016. № 5 (67). С. 69–75.

24. Мартынов Ю.С., Надольский В.В. Статистические параметры базисных переменных, входящих в модели сопротивления стального элемента // Архитектура и строительные науки. 2014. № 1, 2 (18, 19). С. 39–41.

25. Shahabian F., Roberts T.M. Combined shear-and-patch loading of plate girders // Journal of Structural Engineering. 2000. Vol. 126. Issue 3. Pp. 316–321. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2000)126:3(316)

26. Braun B. Stability of steel plates under combined loading. Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität, 2010. 226 p.

27. Свентиков А.А. Исследование влияния запасов прочности на надежность стальных балок // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 9 (741). С. 31–35. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-741-9-31-35

28. Перельмутер А.В., Тур В.В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании? // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Т. 13. № 3. С. 86–102.

Поступила в редакцию 29 марта 2022 г.

Принята в доработанном виде 5 мая 2022 г.

Одобрена для публикации 5 мая 2022 г.

ОБ АВТОРЕ: **Виталий Валерьевич Надольский** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций; **Белорусский национальный технический университет (БНТУ)**; 220013, г. Минск, пр-т Независимости, д. 65, Республика Беларусь; РИНЦ ID: 859575, Scopus: 56153169800, ORCID: 0000-0002-4211-7843; Nadolskivv@mail.by.

REFERENCES

1. Glassman J.D., Garlock M.E.M. A compression model for ultimate postbuckling shear strength. *Thin-Walled Structures*. 2016; 102:258-272. DOI: 10.1016/j.tws.2016.01.016

2. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013; 80:202-212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018

3. Martynov Yu.S., Lagun Yu.I., Nadolski V.V. Shear resistance models of steel elements with account for web buckling. *Metal Constructions*. 2012; 18(2):111-122. (rus.).

4. Hingnekar D.R., Vyavahare A.Y. Mechanics of shear resistance in steel plate girder: Critical review. *Journal of Structural Engineering*. 2020; 146(6):03120001. DOI:10.1061/(asce)st.1943-541x.0002484

5. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders — Tests and numerical model verification. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013; 85:116-129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007
6. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 158:213-229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025
7. Chacon R., Serrat M., Real E. The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading. *Thin-Walled Structures*. 2012; 53:15-25. DOI: 10.1016/j.tws.2011.12.003
8. Nadolski V.V. Analysis of settlement models of resistance to local loading of steel elements. *Bulletin of the Brest State Technical University*. 2016; 1(97):167-171. (rus.).
9. Rogač M., Aleksić S., Lučić D. Influence of patch load length on resistance of I-girders. Part-II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021; 176:106388. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106388
10. Kaledin V.O., Suhanov A.V., Sisauri V.I., Levina E.A. Rigidity and bearing capacity of a composite beam of a bridge covering. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2006; 1:370-380. (rus.).
11. Nadolski V., Sykora M. Model uncertainties in resistances of steel members. *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems*. 2015; 4189-4195. DOI: 10.1201/b19094-548
12. Roberts T.M., Rockey K.C. Method pour predire la charge de ruine d'une poutre a ame mince soumise a une charge simi-repartie dans le plan de l'ame. *Construction Metallique*. 1978; 3:3-13.
13. Roberts T.M., Rockey K.C. A mechanism solution for predicting the collapse loads of slender plate girders when subjected to in-plane patch loading. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1979; 67(1):155-175. DOI: 10.1680/iicp.1979.2322
14. Gozzi J. *Patch loading resistance of plated girders: ultimate and serviceability limit state : Doctoral Thesis*. Sweden, Luleå University of Technology, 2007.
15. Roberts T.M., Chong C.K. Collapse of plate girders under edge loading. *Journal of the Structural Division*. 1981; 107(8):1503-1509. DOI: 10.1061/js-deag.0005762
16. Johansson B., Lagerqvist O. Resistance of plate edges to concentrated forces. *Journal of Constructional Steel Research*. 1995; 32(1):69-105. DOI: 10.1016/0143-974x(94)00010-f
17. Lagerqvist O. *Patch loading resistance of steel girders subjected to concentrated forces : Doctoral Thesis*. Sweden, Luleå University of Technology, 1995.
18. Shimizu S., Yabana H., Yoshida S. A new collapse model for patch-loaded web plates. *Journal of Constructional Steel Research*. 1989; 13(1):61-73. DOI: 10.1016/0143-974x(89)90005-9
19. Bergfelt A. *Girder web stiffening for patch loading*. Chalmers University of Technology, Dept. of Structural Engineering, Div. of Steel and Timber Structures, publ. S 83:1, Geteborg, 1983.
20. Nadol'skij V.V. *Parameters of structural reliability for inspections of bent steel elements according to the limiting states of bearing capacity : dis. ... cand. tech. sciences*. Brest, Brest State Technical University, 2015. (rus.).
21. Nadolski V.V., Martynov Yu.S. Assessment of model uncertainty in shear resistance provided by EN 1993-1-5 and SNIP li-23. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2013; 5:7-20. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.5.7-20 (rus.).
22. Flores R. *Resistance of transversally stiffened hybrid steel plate girders to concentrated loads : Doctoral Thesis*. Barcelona, Polytechnic University of Catalonia, 2009; 221.
23. Tur V., Nadolski V. The partial factor values calibration for the ultimate limit state checking of steel structures for the conditions republic of belarus. Part 2. *Building and Reconstruction*. 2016; 5(67):69-75. (rus.).
24. Martynov Yu.S., Nadol'skij V.V. Statistical parameters of the basic variables included in the resistance models of the steel element. *Architecture and Building Sciences*. 2014; 1,2(18,19):39-41. (rus.).
25. Shahabian F., Roberts T.M. Combined shear-and-patch loading of plate girders. *Journal of Structural Engineering*. 2000; 126(3):316-321. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2000)126:3(316)
26. Braun B. *Stability of steel plates under combined loading*. Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität, 2010; 226.
27. Sventikov A.A. Study of the impact of strength reserves on the reliability of steel beams. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; 9(741):31-35. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-741-9-31-35 (rus.).
28. Perelmuter A.V., Tur V.V. Whether we are ready to proceed to a nonlinear analysis at designing? *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017; 13(3):86-102. (rus.).

Received March 29, 2022.

Adopted in revised form on May 5, 2022.

Approved for publication on May 5, 2022.

BIONOTES: Vitali V. Nadolski — PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Structures; **Belarusian National Technical University (BNTU)**; 65 Independence Avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus; ID RISC: 859575, Scopus: 56153169800, ORCID: 0000-0002-4211-7843; Nadolskivv@mail.by.

Деформации и собственная частота колебаний фермы пространственной модели многоэтажного здания

Михаил Николаевич Кирсанов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Расчет деформаций под действием различных нагрузок и собственных частот колебаний составляет необходимую часть общего расчета многоэтажного здания. Как правило, такие расчеты выполняются численно в различных системах, основанных на методе конечных элементов в специализированных программах. Аналитические решения редки, но они требуются для оценки численных решений и расчета упрощенных моделей сооружения. Ставится задача найти аналитическую зависимость прогиба каркаса многоэтажного здания и его первой собственной частоты от числа панелей. Масса модели фермы предполагается равномерно распределенной по узлам. Учитываются только горизонтальные смещения масс.

Материалы и методы. С целью расчета усилий в стержнях статически определимой фермы методом вырезания узлов в символьной форме применяется программа, составленная в системе компьютерной математики Maple. Расчет смещения узлов производится с помощью интеграла Мора. Использование метода Донкерлея позволяет найти аналитическую форму нижней оценки первой частоты собственных колебаний для произвольной этажности здания. Анализ серии решений в символьной форме для ферм с последовательно увеличивающимся числом панелей дает возможность вывести итоговую расчетную формулу для частоты колебаний. При определении собственных чисел характеристической матрицы использовался оператор Eigenvalues из пакета LinearAlgebra.

Результаты. Полученные формулы для прогиба сооружения (горизонтального смещения) под действием горизонтальной боковой нагрузки и формула для оценки первой частоты колебаний имеют простой вид, удобный для быстрой проверки численного решения и предварительной оценки работоспособности проектируемой конструкции.

Выводы. Предложенная модель пространственной статически определимой модели многоэтажного здания дает возможность вывести расчетные формулы для деформаций и собственных частот сооружения при произвольной его этажности. Полученные формулы могут быть использованы в задачах оптимизации и быть основой при расчете более сложной статически неопределимой модели конструкции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многоэтажное здание, каркас, ветровая нагрузка, собственные колебания, аналитическое решение, формула Максвелла – Мора

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФ 22-21-00473.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кирсанов М.Н. Деформации и собственная частота колебаний фермы пространственной модели многоэтажного здания // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 5. С. 580–588. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.580-588

Автор, ответственный за переписку: Михаил Николаевич Кирсанов, C216@ya.ru.

Deformations and natural vibration frequency of a three-dimensional truss in a multi-storey building

Mikhail N. Kirsanov

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

ABSTRACT

Introduction. The analysis of deformations arising under the action of various loads and natural vibration frequencies is an integral part of the structural analysis of a multi-storey building. As a rule, this analysis is performed numerically in various systems using the finite element method and specialized software programmes. Analytical solutions are rare, but they are needed to evaluate the numerical ones and calculate simplified models of structures. The task is to find the analytical dependence of the frame deflection in a multi-storey building and its first natural frequency on the number of panels. The mass of the truss model is assumed to be distributed uniformly over the nodes. Only horizontal displacements of masses are taken into account.

Materials and methods. To calculate the forces arising in the rods of a statically determinate truss using the method of joint isolation in the algebraic form, the software compiled in the Maple math system is applied. The calculation of displacements of nodes is performed using the Mohr integral. The Dunkerley method allows finding the analytical form of the lower estimate of the first frequency of natural vibrations for an arbitrary number of storeys in a building. The analysis of a series of solutions, made in the algebraic form for trusses with a successively growing number of panels allows deriving the final

vibration frequency formula. When determining the natural vibrations of the characteristic matrix, the Eigenvalues operator from the LinearAlgebra package was used.

Results. The resulting formulas used to analyze the deflection (horizontal displacement) of a structure under the action of a horizontal lateral load and the formula for estimating the first vibration frequency have simple forms, convenient for the quick verification of numerical solutions and preliminary evaluation of the behaviour of a designed structure.

Conclusions. The proposed spatial statically determinate model of a multi-storey building allows deriving formulas for the analysis of deformations and natural frequencies of a structure with an arbitrary number of storeys. Resulting formulas can be applied to solve optimization tasks and serve as the basis for calculating a more complex statically indeterminate model of a structure.

KEYWORDS: multi-storey building, frame, wind load, natural vibrations, analytical solution, Maxwell – Mohr formula

Acknowledgements.

This work was financially supported by the Russian Science Foundation 22-21-00473.

FOR CITATION: Kirsanov M.N. Deformations and natural vibration frequency of a three-dimensional truss in a multi-storey building. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):580-588. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.580-588 (rus.).

Corresponding author: Mikhail N. Kirsanov, C216@ya.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) и колебаний многоэтажных зданий является расчет упрощенных модельных представлений каркасов зданий [1, 2]. Расчеты, как правило, производятся в численной форме в различных специализированных программах, основанных на методе конечных элементов [3–6]. В более сложных моделях при расчете динамики сооружения используется волновая теория [7]. Уровни вибрации зданий от движения поездов метрополитена изучены в исследовании [8]. Дискретно-континуальный подход к численному моделированию НДС высотных зданий применялся в работе [9]. Влияние свойств грунтов на состояние высотных зданий рассмотрено в публикации [10]. Альтернативой численным методам в расчете строительных конструкций служат аналитические методы. В трудах [11, 12] в системе символьной математики использовался метод представления решения в виде рядов. Для регулярных систем аналитические решения в виде конечных формул дает метод индукции [13]. Одними из первых, кто поднял проблему существования и расчета регулярных статически определимых стержневых конструкций, были R.G. Hutchinson и N.A. Fleck [14, 15]. Получены формулы для прогиба ряда плоских регулярных ферм с произвольным числом панелей [16–20]. Аналогичные решения для пространственных ферм, как правило, более сложны [21]. В исследовании [22] приведены различные схемы регулярных плоских ферм и формулы для вычисления их прогибов для различных нагрузок в зависимости от числа панелей. Метод индукции применялся также в решениях задач о колебании фермы [21, 23–25].

В настоящей работе рассматривается регулярная статически определимая пространственная ферма многоэтажного здания (рис. 1). Высота этажа h . Два крыла здания по n панелей по горизонтали и k этажей соединены центральной частью, содержащей боковые раскосы длиной $\sqrt{a^2 + h^2}$ и $\sqrt{b^2 + h^2}$. В общем случае крылья здания несимметричны, ширина одного из них — a , другого — b . Ставится

задача найти аналитическую зависимость прогиба каркаса многоэтажного здания от числа панелей при действии боковой равномерно распределенной по узлам ветровой стационарной нагрузки. Цель исследования — индуктивным методом, пользуясь нижней оценкой Донкерлея, вывести формулу для первой частоты собственных колебаний конструкции с произвольным числом панелей.

Число стержней фермы $n_r = 6k(n + m + 2)$, включая $2(n + m) + 4$ опорные стойки и по три опорных раскоса в средней части корпуса на каждом этаже. Число внутренних узлов фермы $K = 2k(n + m + 2)$.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчет усилий в стержнях. Для расчета усилий в статически определимых фермах не требуется

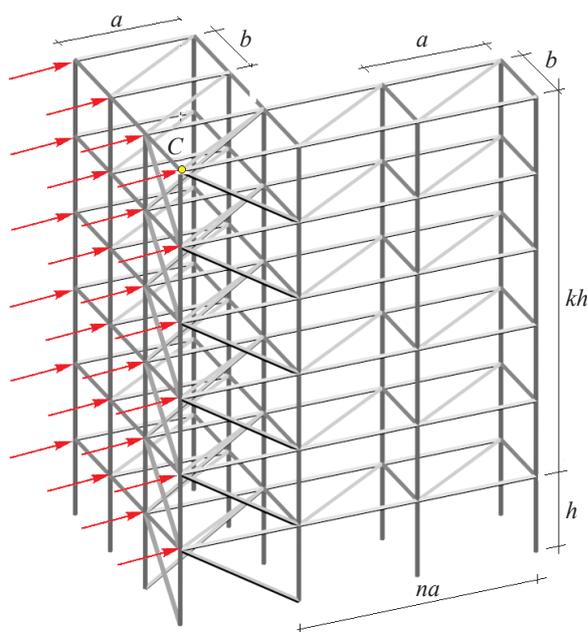


Рис. 1. Схема здания. Боковая равномерная узловая нагрузка интенсивностью P

Fig. 1. The structural diagram of the building. The lateral uniform nodal load having intensity P

численный метод. Усилия рассчитываются методом вырезания узлов. Для этого составляется система уравнений равновесия всех узлов в проекции на три оси координат. В систему уравнений в качестве неизвестных входят и реакции опор. Матрица системы уравнений состоит из направляющих косинусов усилий, значения которых вычисляются по координатам узлов и порядку соединения стержней в узлах. Стержни и узлы нумеруются (рис. 2).

$$q = 2(j-1)(m+n+2),$$

$$x_{i+q} = a(i-1),$$

$$y_{i+q} = bm,$$

$$z_{i+q} = hj, \quad i = 1, \dots, n+1,$$

$$x_{i+n+1+q} = an,$$

$$y_{i+n+1+q} = b(m-i),$$

$$z_{i+n+1+q} = hj, \quad i = 1, \dots, m,$$

$$x_{i+n+m+1+q} = a(i-1),$$

$$y_{i+n+m+1+q} = b(m+1),$$

$$z_{i+n+m+1+q} = hj, \quad i = 1, \dots, n+2,$$

$$x_{i+2n+m+3+q} = a(n+1),$$

$$y_{i+2n+m+3+q} = b(m-i+1),$$

$$z_{i+2n+m+3+q} = hj, \quad i = 1, \dots, m+1.$$

Номера концов стержней записываются в специальные списки $\Phi_i, i = 1, \dots, n_r$, задающие структуру конструкции. Стойки в здании, например, кодируются так:

$$\Phi_{i+k(4m+n)+5+\theta(j-1)} = [i + \theta(j-1), i + \theta j],$$

$$j = 1, \dots, k-1, \quad i = 1, \dots, \theta,$$

где $\theta = 2(m+n) + 4$.

Направляющие косинусы имеют вид: $g_{v,i} = (v_{\Phi_i,1} - v_{\Phi_i,2}) / l_i, i = 1, \dots, n_r$, где первый индекс v указывает на ось проекции $v = x, y, z$; второй индекс — номер стержня; $l_i = \sqrt{\sum_{v=x,y,z} (v_{\Phi_i,1} - v_{\Phi_i,2})^2}$ — длина стержня. Элементы матрицы системы уравнений равновесия узлов имеют вид:

$$G_{3\Phi_{i,1}-2+j,i} = g_{j,i}, \quad G_{3\Phi_{i,2}-2+j,i} = -g_{j,i},$$

$$j = 1, 2, 3, \quad i = 1, \dots, n_r,$$

где параметр j — это номер осей x, y, z соответственно.

Система уравнений равновесия узлов записывается в матричном виде $GS = T$, где S — вектор, содержащий неизвестные усилия и реакции опор. Вектор нагрузок T имеет длину n_r . Нагрузки, приложенные к узлу i в проекции на ось x , записываются в элементы T_{3i-2} , на ось y — в элементы T_{3i-1} . Вертикальные внешние силы содержатся в элементах T_{3i} , $i = 1, \dots, K$. Для решения матричного уравнения в символьной форме в системе компьютерной математики Maple используется метод обратной

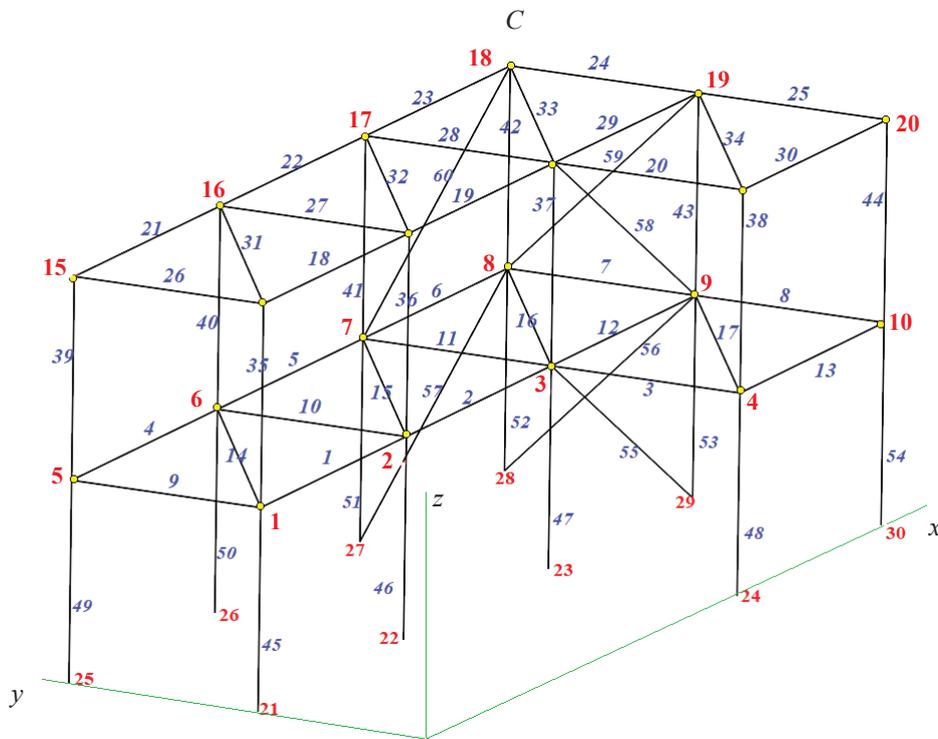


Рис. 2. Нумерация узлов и стержней фермы, $k = 2, n = 3, m = 1$

Fig. 2. The numbering of truss nodes and rods, $k = 2, n = 3, m = 1$

матрицы: $\mathbf{S} = \mathbf{G}^{-1}\mathbf{T}$. По сравнению со специальными операторами пакета LinearAlgebra этот метод более быстрый.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Деформации от ветровой нагрузки. Многоэтажные здания, обладая большой парусностью, могут иметь заметные деформации от боковой ветровой нагрузки. Рассмотрим, например, равномерно распределенную узловую нагрузку интенсивностью P , приложенную перпендикулярно к одной из стен здания (рис. 1). Вычислим перемещение по направлению действия нагрузки точки C . По формуле Максвелла – Мора получим:

$$\Delta = \sum_{\alpha=1}^{n_s} S_{\alpha}^{(P)} S_{\alpha}^{(1)} l_{\alpha} / (EF). \quad (1)$$

Сумма составлена по всем деформируемым стержням конструкции, включая опорные стойки и раскосы. Здесь введены обозначения: $S_{\alpha}^{(P)}$ — усилие от действия внешней нагрузки в стержне с номером α ; $S_{\alpha}^{(1)}$ — усилие в этом же стержне от действия единичной горизонтальной силы, приложенной к узлу C , перемещение которого разыскивается; l_{α} — длина стержня; E — модуль упругости материала; F — площадь поперечного сечения стержня.

Проанализируем случай симметричной конструкции: $m = n$. Задача имеет два натуральных параметра: число панелей n и число этажей k . Обозначим $\Delta_{k,n}$ горизонтальное смещение узла C конструкции с n панелями и k этажами. Фиксируем сначала k и находим прогиб для нескольких ферм с последовательно увеличивающимся числом панелей. При $k = 2$ в результате расчетов по формуле (1) имеем:

$$\begin{aligned} \Delta_{2,1} &= P \frac{9(a^2 + c^2) + 39h^2}{EFa^2}, \\ \Delta_{2,2} &= P \frac{12(a^2 + c^2) + 62h^2}{EFa^2}, \\ \Delta_{2,3} &= P \frac{15(a^2 + c^2) + 90h^2}{EFa^2}, \\ \Delta_{2,4} &= P \frac{18(a^2 + c^2) + 123h^2}{EFa^2}, \\ \Delta_{2,5} &= P \frac{21(a^2 + c^2) + 161h^2}{EFa^2}, \dots \end{aligned}$$

Здесь $c = \sqrt{a^2 + h^2}$. Пользуясь операторами Maple, обобщаем эти выражения по числу панелей n :

$$\Delta_{2,n} = P \frac{(3n+6)(a^3 + c^3) + (5n^2/2 + 31n/2 + 21)h^3}{EFa^2}. \quad (2)$$

Аналогично, при других значениях k имеем выражения:

$$\begin{aligned} \Delta_{1,n} &= P \frac{(n+2)(a^3 + c^3 + h^3)}{EFa^2}, \\ \Delta_{3,n} &= P \frac{(6n+12)(a^3 + c^3) + (13n^2 + 71n + 90)h^3}{EFa^2}, \\ \Delta_{4,n} &= P \frac{(10n+20)(a^3 + c^3) + (40n^2 + 210n + 260)h^3}{EFa^2}, \\ \Delta_{5,n} &= P \frac{(15n+30)(a^3 + c^3) + (95n^2 + 490n + 600)h^3}{EFa^2}, \dots \end{aligned} \quad (3)$$

Находим общие члены последовательности коэффициентов при подобных слагаемых в выражениях (2), (3). Получим итоговую зависимость смещения точки C в зависимости от размеров фермы, числа этажей и панелей:

$$\Delta_{k,n} = P \frac{C_1(a^3 + c^3) + C_2h^3}{EFa^2}, \quad (4)$$

где $C_1 = (n+2)k(k+1)/2$,

$$C_2 = k(k+1)(n+2)(3(n+3)k^2 + (n+3)k - 4n)/24. \quad (5)$$

Заметим, что решение не зависит от размера b . Введем величину безразмерного прогиба $\Delta' = EF\Delta_{k,n}/(P_0H)$, отнесенного к высоте фермы $H = kh$ и суммарной нагрузке $P_0 = (n+2)kP$. Построим графики зависимости (4) с коэффициентами (5) от числа этажей (рис. 3).

Кривые, построенные для различных размеров a , пересекаются. Начиная с высоты 2 этажа порядок кривых меняется. Для малой этажности перемещение тем больше, чем больше величина a , для зданий выше трех этажей зависимость от этой величины более естественная: чем больше ширина здания a , тем меньше смещение узла C . Кривые имеют квадратичную асимптотику: $\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta'/k^2 = h^2(n+3)/(8a^2)$.

Оценка нижней частоты собственных колебаний. Инерционные свойства здания моделируем равными сосредоточенными в узлах массами. Число степеней свободы в предположении, что массы смещаются только по горизонтали, равно числу узлов $K = 2k(n+m+2)$. Решить задачу о собственных частотах системы с многими степенями свободы не представляется возможным. Метод Донкерлея [21, 23–26] позволяет получить нижнюю аналитическую оценку первой собственной частоты.

Приближенная оценка частоты по Донкерлею ω_D выражается через парциальные частоты ω_p :

$$\omega_D^{-2} = \sum_{p=1}^K \omega_p^{-2}. \quad (6)$$

При вычислении парциальных частот необходимо составить отдельные дифференциальные уравнения для масс μ :

$$\begin{aligned} \mu \ddot{y}_p + d_p y_p &= 0, \\ p &= 1, \dots, K, \end{aligned}$$

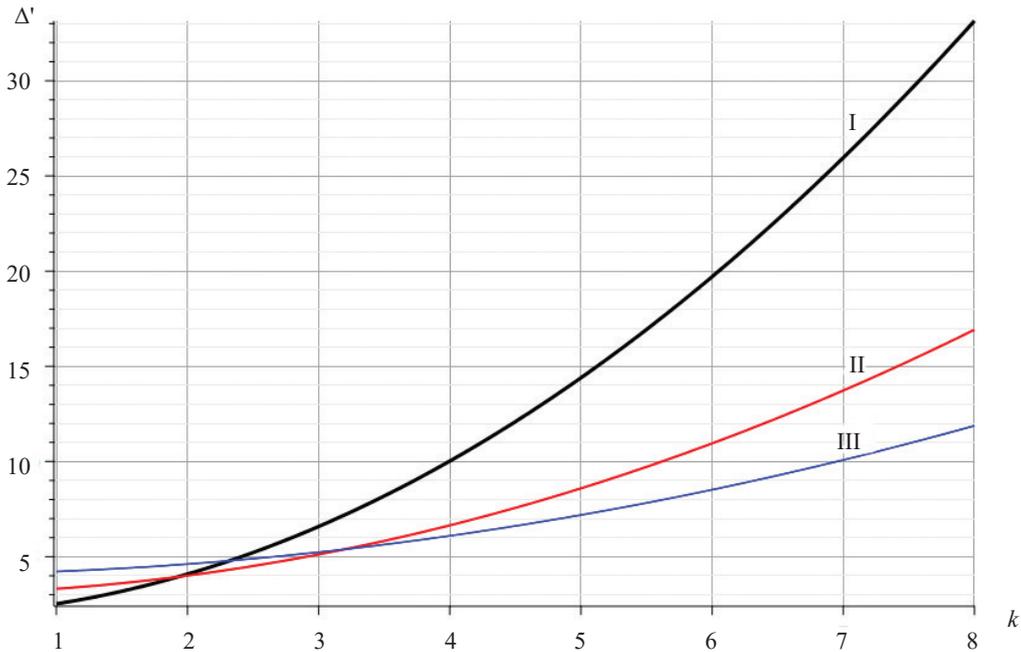


Рис. 3. Зависимость смещения узла C от числа этажей: I — a = 8 м; II — a = 12 м; III — a = 16 м

Fig. 3. The dependence of the displacement of node C on the number of storeys: I — a = 8 m; II — a = 12 m; III — a = 16 m

где \ddot{y}_p — ускорение; d_p — коэффициент жесткости; y_p — смещение массы в узле. Отсюда частота колебаний отдельного груза имеет вид

$$\omega_p = \sqrt{d_p/\mu}. \quad (7)$$

Коэффициент жесткости вычисляется по формуле Максвелла – Мора:

$$\delta_p = 1/d_p = \sum_{j=1}^{n_r} (S_j^{(p)})^2 l_j / (EF). \quad (8)$$

Из формул (6) и (7) следует $\omega_D^{-2} = \sum_{p=1}^K \omega_p^{-2} = \mu \sum_{p=1}^K \frac{1}{d_p}$. Так как податливость есть величина, обратная жесткости $1/d_p = \delta_p$, то

$$\omega_D^{-2} = \mu \sum_{i=1}^K \delta_i = \mu \sum_{p=1}^K \sum_{\alpha=1}^{n_r} (\tilde{S}_\alpha^{(p)})^2 l_\alpha / (EF) = \mu \Sigma_k / (h^2 EF). \quad (9)$$

Последовательно вычислим суммы $\Sigma_k = h^2 \times \sum_{p=1}^K \sum_{\alpha=1}^{n_r} (\tilde{S}_\alpha^{(p)})^2 l_\alpha$ при $n = m = 1, a = b, k = 1, 2, 3, \dots$

$$\begin{aligned} \Sigma_1 &= (14\sqrt{2} + 16)a^3 + 30c^3 + 30h^3, \\ \Sigma_2 &= (28\sqrt{2} + 62)a^3 + 90c^3 + 266h^3, \\ \Sigma_3 &= (42\sqrt{2} + 138)a^3 + 180c^3 + 1060h^3, \\ \Sigma_4 &= (56\sqrt{2} + 244)a^3 + 300c^3 + 2940h^3, \\ \Sigma_5 &= (70\sqrt{2} + 380)a^3 + 450c^3 + 6610h^3, \dots \end{aligned} \quad (10)$$

В общем случае $\Sigma_k = C_1 a^3 + C_2 c^3 + C_3 h^3$, где коэффициенты в этом выражении определяются как общие члены коэффициентов в выражении (10). Методами Maple с использованием операторов составления и решения рекуррентных уравнений получим:

$$C_1 = k(14\sqrt{2} + 1 + 15k),$$

$$C_2 = 15k(k + 1),$$

$$C_3 = k(k + 1)(22k^2 + 22k + 1)/3.$$

В результате имеем нижнюю оценку для первой частоты по Донкерлею:

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

Для оценки степени приближения этого решения вычислим численно весь спектр частот конструкции и сравним частоту ω_D с наименьшей частотой спектра.

Динамика системы с K степенями свободы описывается системой дифференциальных уравнений движения грузов в матричном виде:

$$\mathbf{M}_K \ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{D}_K \mathbf{Y} = 0, \quad (11)$$

где \mathbf{M}_K — матрица инерции размером $K \times K$; $\ddot{\mathbf{Y}}$ — вектор ускорений; \mathbf{D}_K — матрица жесткости; \mathbf{Y} — вектор вертикальных перемещений масс 1, ..., K. В случае одинаковых масс матрица инерции выражается через единичную матрицу $\mathbf{M}_K = \mu \mathbf{I}_K$. Матрица податливости \mathbf{B}_K , являющаяся обратной к матрице

жесткости \mathbf{D}_K , определяется по формуле Максвелла – Мора:

$$b_{i,j} = \sum_{\alpha=1}^{n_s} S_{\alpha}^{(i)} S_{\alpha}^{(j)} l_{\alpha} / (EF), \quad (12)$$

где $S_{\alpha}^{(i)}$ — усилие в стержне α от действия единичной вертикальной силы в узле i . Задача сводится к проблеме собственных чисел матрицы \mathbf{B}_K . Умножая слева матричное уравнение (11) на \mathbf{B}_K с учетом замены $\dot{\mathbf{Y}} = -\omega^2 \mathbf{Y}$, соответствующей гармоническим колебаниям $z_i = u_i \sin(\omega t + \varphi_0)$, получим $\mathbf{B}_K \mathbf{Z} = \lambda \mathbf{Z}$, где $\lambda = 1/(\mu\omega^2)$ — собственное число матрицы \mathbf{B}_K ; ω — собственная частота колебаний. Отсюда $\omega = \sqrt{1/(\mu\lambda)}$. Для определения собственного числа матрицы можно использовать оператор Eigenvalues из пакета LinearAlgebra системы Maple.

Рассмотрим пример здания с k этажами с размерами $h = 3,25$ м, $a = 6$ м, $\mu = 600$ кг. Жесткость стальных стержней фермы примем $EF = 1,62 \times 10^6$ кН. На рис. 4 построены зависимости оценки ω_D Донкерлея и первой частоты собственных колебаний системы с K степенями свободы, полученной численно. Заметно некоторое повышение точности оценки с увеличением этажности здания.

Найдем зависимость относительной погрешности оценки Донкерлея от числа панелей по высоте сооружения и высоты каждой панели (этажа) h . Введем обозначение для величины погрешности $\varepsilon = |\omega_D - \omega_1|/\omega_1$. На рис. 5 три кривые, рассчитанные для разных высот, показывают, что наибольшая точность расчетов достигается для высоких зданий с большим числом этажей.

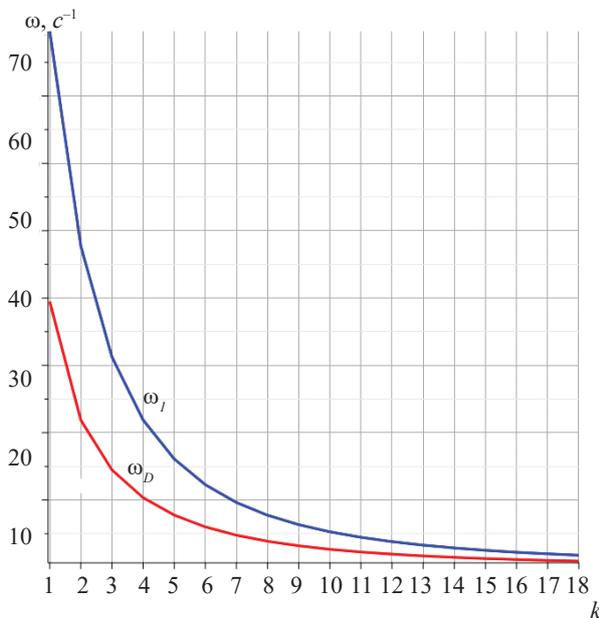


Рис. 4. Сравнение аналитической нижней оценки первой собственной частоты по методу Донкерлея с первой частотой спектра частот, полученной численно

Fig. 4. Using the Dunkerley method to compare the analytical lower estimate of the first natural frequency with the numerically derived first frequency of the spectrum

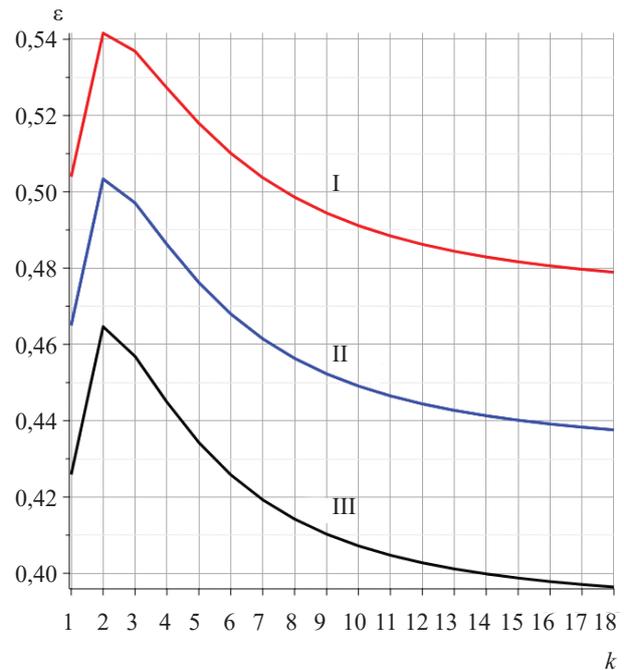


Рис. 5. Относительная погрешность оценки Донкерлея: I — $h = 3,25$ м; II — $h = 3,5$ м; III — $h = 3,75$ м

Fig. 5. The relative error of the Dunkerley estimation: I — $h = 3.25$ m; II — $h = 3.5$ m; III — $h = 3.75$ m

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена простая математическая модель стального каркаса многоэтажного здания в виде статически определимой фермы. Принятые упрощения реальной статически неопределимой конструкции, содержащей не только стержни, но и плиты, позволили получить простые расчетные формулы для величины горизонтального смещения угловой точки здания на верхнем этаже в зависимости от числа панелей при действии на здание ветровой горизонтальной нагрузки. Эта задача решена в два этапа для двух натуральных параметров регулярности, которые определяют число этажей k и число панелей n в каждом из двух отсеков. Сначала проводилась индукция по одному параметру, в результате которой получалась некоторая промежуточная общая формула, затем серия этих формул обобщалась по другому параметру. Для проверки решения очередность параметров менялась. Решена и другая задача для предложенной конструкции — расчет нижней собственной частоты в приближении Донкерлея. Точность полученного решения оказалась не очень высокой, но с увеличением высоты h и этажности k здания точность росла. Это особенно ценно потому, что каркасные модели высоких зданий содержат большое число стержней и в численном решении в этом случае может сказываться эффект накопления ошибок округления. Разработанный алгоритм может быть использован и для других каркасных сооружений как основа для более сложных расчетов, например, методом сил.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Shatilov Y.Y., Lyapin A.A.* Vibration-based damage detection techniques for health monitoring of construction of a multi-storey building // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 931. Pp. 178–183. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.931.178
2. *Rafezy B., Zare A., Howson W.P.* Coupled lateral–torsional frequencies of asymmetric, three-dimensional frame structures // *International Journal of Solids and Structures*. 2007. Vol. 44. Issue 1. Pp. 128–144. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.04.019
3. *Alam Z., Sun L., Zhang C., Su Z., Samali B.* Experimental and numerical investigation on the complex behaviour of the localised seismic response in a multi-storey plan-asymmetric structure // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2021. Vol. 17. Issue 1. Pp. 86–102. DOI: 10.1080/15732479.2020.1730914
4. *Wang Y., Thambiratnam D.P., Chan T.H.T., Nguyen A.* Method development of damage detection in asymmetric buildings // *Journal of Sound and Vibration*. 2018. Vol. 413. Pp. 41–56. DOI: 10.1016/j.jsv.2017.10.015
5. *Юзвенко А.Ю.* Анализ возможностей программного комплекса Autodesk Robot Structural Analysis Professional для динамического расчета многоэтажного здания // *Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника*. 2019. Т. 9. № 1. С. 40–49.
6. *Малахова А., Мухин М.* Проектирование железобетонных конструкций с использованием программного комплекса ЛИРА : учебное пособие. М. : НИУ МГСУ, 2016. 119 с.
7. *Назаров Ю.П., Позняк Е.В., Филимонов А.В.* Анализ вида волновой модели и получение расчетных параметров сейсмического воздействия для высотного здания // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 5. С. 40–45.
8. *Дашевский М.А., Мондрус В.Л.* Прогноз уровня вибрации зданий от движения поездов метрополитена // *Промышленное и гражданское строительство*. 2013. № 11. С. 52–54.
9. *Акимов П.А.* О развитии дискретно-континуального подхода к численному моделированию состояния несущих систем высотных зданий // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 3. С. 16–20.
10. *Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З.* Исследования грунтов оснований высотных зданий // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2009. № 5. С. 2–12.
11. *Goloskokov D.P., Matrosov A.V.* A superposition method in the analysis of an isotropic rectangle // *Applied Mathematical Sciences*. 2016. Vol. 10. Pp. 2647–2660. DOI: 10.12988/ams.2016.67211
12. *Goloskokov D.P., Matrosov A.V.* Comparison of two analytical approaches to the analysis of grillages // 2015 International Conference “Stability and Control Processes” in Memory of V.I. Zubov (SCP). 2015. DOI: 10.1109/SCP.2015.7342169
13. *Бука-Вайваде К., Курсанов М.Н., Сердюк Д.О.* Calculation of deformations of a cantilever-frame planar truss model with an arbitrary number of panels // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 4. С. 510–517. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517
14. *Hutchinson R.G., Fleck N.A.* Microarchitected cellular solids — the hunt for statically determinate periodic trusses // *ZAMM*. 2005. Vol. 85. Issue 9. Pp. 607–617. DOI: 10.1002/zamm.200410208
15. *Hutchinson R.G., Fleck N.A.* The structural performance of the periodic truss // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2006. Vol. 54. Issue 4. Pp. 756–782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008
16. *Dai Qiao.* Analytical dependence of planar truss deformations on the number of panels // *AlfaBuild*. 2021. Vol. 17. Issue 2. P. 1701. DOI: 10.34910/ALF.17.1
17. *Комерзан Е.В., Свириденко О.В.* Аналитический расчет прогиба плоской внешне статически неопределимой фермы с произвольным числом панелей // *Строительная механика и конструкции*. 2021. № 2 (29). С. 29–37.
18. *Ovsyannikova V.M.* Dependence of deformations of a trapezous truss beam on the number of panels // *Structural Mechanics and Structures*. 2020. № 3 (26). Pp. 13–20.
19. *Овсянникова В.М.* Зависимость прогиба плоской внешне статически неопределимой фермы от числа панелей // *Строительная механика и конструкции*. 2020. № 4 (27). С. 16–25.
20. *Суд И.Б.* Вывод формул для прогиба шпренгельной балочной фермы с произвольным числом панелей в системе Maple // *Строительная механика и конструкции*. 2020. № 2 (25). С. 25–32.
21. *Kirsanov M., Vorobyev O.* Calculating of a spatial cantilever truss natural vibration frequency with an arbitrary number of panels: analytical solution // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2021. Vol. 94. Issue 1. P. 9402. DOI: 10.4123/CUBS.94.2
22. *Kirsanov M.N.* Planar Trusses: Schemes and Formulas. UK : Cambridge Scholars Publishing, 2019. 206 p.
23. *Petrenko V.* The natural frequency of a two-span truss // *AlfaBuild*. 2021. Vol. 20 Issue 5 (20). P. 2001. DOI: 10.34910/ALF.20.1
24. *Петренко В.Ф.* Оценка собственной частоты двухпролетной фермы с учетом жесткости опор // *Строительная механика и конструкции*. 2021. № 4 (31). С. 16–25. DOI: 10.36622/VSTU.2021.31.4.002
25. *Петриченко Е.А.* Нижняя граница частоты собственных колебаний фермы Финка // *Строительная механика и конструкции*. 2020. № 3 (26). С. 21–29.
26. *Levy C.* An iterative technique based on the Dunkerley method for determining the natural frequencies of vibrating systems // *Journal of Sound and Vibration*. 1991. Vol. 150. Issue 1. Pp. 111–118. DOI: 10.1016/0022-460X(91)90405-9

Поступила в редакцию 30 марта 2022 г.

Принята в доработанном виде 5 мая 2022 г.

Одобрена для публикации 5 мая 2022 г.

ОБ АВТОРЕ: **Михаил Николаевич Кирсанов** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин; **Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»);** 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; SPIN-код: 8679-6853, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, Google Scholar: FfoNGFwAAAAJ, IстинаResearcherID: 2939132; C216@ya.ru.

REFERENCES

1. Shatilov Y.Y., Lyapin A.A. Vibration-based damage detection techniques for health monitoring of construction of a multi-storey building. *Materials Science Forum*. 2018; 931:178-183. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.931.178
2. Rafezy B., Zare A., Howson W.P. Coupled lateral-torsional frequencies of asymmetric, three-dimensional frame structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2007; 44(1):128-144. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.04.019
3. Alam Z., Sun L., Zhang C., Su Z., Samali B. Experimental and numerical investigation on the complex behaviour of the localised seismic response in a multi-storey plan-asymmetric structure. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2021; 17(1):86-102. DOI: 10.1080/15732479.2020.1730914
4. Wang Y., Thambiratnam D.P., Chan T.H.T., Nguyen A. Method development of damage detection in asymmetric buildings. *Journal of Sound and Vibration*. 2018; 413:41-56. DOI: 10.1016/j.jsv.2017.10.015
5. Yuzvenko A.Yu. Analysis of the capabilities of autodesk robot structural analysis professional software package for dynamic calculation of a multi-storey building. *Vestnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science*. 2019; 9(1):40-49. (rus.).
6. Malakhova A., Mukhin M. *Design of reinforced concrete structures using the LIRA software package: textbook*. Moscow, NRU MGSU, 2016; 119. (rus.).
7. Nazarov Y.P., Poznyak E.V., Filimonov A.V. Wave model analysis and calculation of seismic impact parameters for high-rise building. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 5:40-45. (rus.).
8. Dashevskij M.A., Mondrus V.L. Prognosis of vibration levels of buildings from underground train traffic. *Industrial and Civil Engineering*. 2013; 11:52-54. (rus.).
9. Akimov P.A. About development of discrete-continual approach to numerical modeling of load-bearing structures of high-rise buildings. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 3:16-20. (rus.).
10. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z. Soil beds of high-rise buildings. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2009; 5:2-12. (rus.).
11. Goloskokov D.P., Matrosov A.V. A superposition method in the analysis of an isotropic rectangle. *Applied Mathematical Sciences*. 2016; 10:2647-2660. DOI: 10.12988/ams.2016.67211
12. Goloskokov D.P., Matrosov A.V. Comparison of two analytical approaches to the analysis of grillages. *2015 International Conference "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov (SCP)*. 2015. DOI: 10.1109/SCP.2015.7342169
13. Buka-Vaivade K., Kirsanov M.N., Serdjuk D.O. Calculation of deformations of a cantilever-frame planar truss model with an arbitrary number of panels. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(4):510-517. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.510-517
14. Hutchinson R.G., Fleck N.A. Microarchitected cellular solids — the hunt for statically determinate periodic trusses. *ZAMM*. 2005; 85(9):607-617. DOI: 10.1002/zamm.200410208
15. Hutchinson R.G., Fleck N.A. The structural performance of the periodic truss. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2006; 54(4):756-782. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.10.008
16. Dai Qiao. Analytical dependence of planar truss deformations on the number of panels. *AlfaBuild*. 2021; 17(2):1701. DOI: 10.34910/ALF.17.1
17. Komerzan E.V., Sviridenko O.V. Analytical calculation of the deflection of a plane external statically undetermined truss with an arbitrary number of panels. *Structural Mechanics and Structures*. 2021; 2(29):29-37. (rus.).
18. Ovsyannikova V.M. Dependence of deformations of a trapezous truss beam on the number of panels. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 3(26):13-20. (rus.).
19. Ovsyannikova V.M. Dependence of the deflection of a planar external statically undetermined truss on the number of panels. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 4(27):16-25. (rus.).
20. Sud I.B. Derivation of formulas for deflection of the girder truss with an arbitrary number of panels in the Maple system. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 2(25):25-32. (rus.).
21. Kirsanov M., Vorobyev O. Calculating of a spatial cantilever truss natural vibration frequency

with an arbitrary number of panels: analytical solution. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2021; 94(1):9402. DOI: 10.4123/CUBS.94.2

22. Kirsanov M.N. *Planar Trusses: Schemes and Formulas*. UK, Cambridge Scholars Publishing, 2019; 206.

23. Petrenko V. The natural frequency of a two-span truss. *AlfaBuild*. 2021; 20(5):(20):2001. DOI: 10.34910/ALF.20.1

24. Petrenko V.F. Estimation of the natural frequency of a two-span truss, taking into account the sup-

port stiffness. *Structural Mechanics and Structures*. 2021; 4(31):16-25. DOI: 10.36622/VSTU.2021.31.4.002 (rus.).

25. Petrichenko E.A. Lower bound of the natural oscillation frequency of the fink truss. *Structural Mechanics and Structures*. 2020; 3(26):21-29. (rus.).

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

Received March 30, 2022.

Adopted in revised form on May 5, 2022.

Approved for publication on May 5, 2022.

B I O N O T E S: **Mikhail N. Kirsanov** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Robotics, Mechatronics, Dynamics and Strength of Machines; **National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI)**; 14 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russian Federation; SPIN-code: 8679-6853, Scopus: 16412815600, ResearcherID: H-9967-2013, ORCID: 0000-0002-8588-3871, Google Scholar: FfoNGFwAAAAJ, IstinaresearcherID: 2939132; C216@ya.ru.

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 502 : 504 : 69 : 004

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.589-602

Экологический мониторинг атмосферы вблизи полигона «Саларьево»

Артур Альбертович Ковригин, Михаил Юрьевич Слесарев

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Объект исследования — атмосферный воздух над территорией закрытого полигона твердых промышленных и бытовых отходов «Саларьево», расположенного в Ленинском районе Московской области южнее п. Саларьево. Полигон подлежал двухэтапной рекультивации, по итогу которой был организован мониторинг составляющих природной среды: вода, почва, воздух. Рассмотрен комплекс мероприятий по непрерывному мониторингу состояния ключевых компонентов окружающей среды в условиях атмосферы вокруг эксплуатируемого объекта по сортировке и размещению отходов. Главная задача мониторинга — отслеживание динамики изменения основных параметров состояния окружающей среды, выявление причин ухудшения окружающей среды, выработка рекомендаций по оптимизации природоохранной деятельности на объекте.

Материалы и методы. Росприроднадзор представлен перечень из 163-х применяющихся в настоящее время методик расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками, в котором только 15 методик утверждены уполномоченными федеральными органами исполнительной власти в установленном порядке. Однако методики для оценки загрязнений атмосферы вблизи полигонов захоронения твердых промышленных и бытовых отходов не существует, поэтому исследования и анализ результатов мониторинга вблизи полигона «Саларьево» актуальны.

Результаты. В ходе проведения работ по рекультивации полигона и по ее завершению производилось исследование устойчивости динамики изменений воздушной среды с целью прогнозирования непредвиденных случайных выбросов свалочных газов, отобранные образцы подвергались сравнительному анализу с нормативными предельно-допустимыми концентрациями (ПДК) на предмет влияния на здоровье человека, фауну и флору окружающей городской среды.

Выводы. По итогам мониторинга воздушной среды в процессе рекультивации и по ее завершению сделано заключение, что фоновые концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе ниже нормативного уровня ПДК. Модель мониторинга экологической безопасности функционирования технических средств и инженерных систем полигона «Саларьево» соответствует «зеленым» технологиям среды жизнедеятельности по критериям комфортности и безопасности городской территории вблизи полигона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мониторинг, атмосфера, полигон, захоронение отходов, прогнозы изменения условий, окружающая среда, экологическая безопасность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ковригин А.А., Слесарев М.Ю. Экологический мониторинг атмосферы вблизи полигона «Саларьево» // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 5. С. 589–602. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.589-602

Автор, ответственный за переписку: Артур Альбертович Ковригин, arturkovrigin62@yandex.ru.

Ecological monitoring of the atmosphere close to Salaryevo landfill

Artur A. Kovrigin, Mikhail Yu. Slesarev

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

ABSTRACT

Introduction. Today air safety problems affect the interests of all countries. The object of the study is atmospheric air above the territory of Salaryevo, a closed solid waste landfill, located in the Leninsky district of the Moscow region to the south of Salaryevo village. To improve the environmental safety of the adjacent territory, the landfill was subjected to the two-stage reclamation procedure. The state of the main components of the natural environment, namely, water, soil, and air, was monitored after the reclamation. The authors consider environmental monitoring as a set of measures to track the state of the main components of the environment, or the atmosphere above a closed solid waste landfill. The main task of monitoring actions is to track changes in the core environmental parameters, identify sources and causes of environmental degradation, and develop recommendations for optimizing environmental protection activities at the landfill.

Materials and methods. Rosprirodnadzor (Federal Service for Supervision of Natural Resources) presented a list of 163 methods for calculating harmful (polluting) substances emitted by stationary sources into the atmospheric air, only 15 of which are duly approved by the authorized federal executive authorities. However, there is no methodology for assessing air

pollution near landfills designated for solid industrial and domestic wastes. Hence, the research and analysis of monitoring findings near Salaryevo landfill are relevant.

Results. The ongoing monitoring of the main components of the environment allow to make most accurate forecasts of changes in environmental conditions under the influence of waste disposal and the best solutions towards the optimization of process flows underway at the landfill. In the course of the landfill reclamation and upon its completion, the authors studied the stability of changes in the air environment to predict any unforeseen accidental emissions of landfill gases. Selected samples were compared with maximally allowable concentration values in terms of their impact on human health, fauna and flora of the urban environment.

Conclusions. The conclusion is that background concentrations of harmful substances in the atmospheric air are below maximally allowable concentration values. These values were obtained as a result of the air monitoring in the course and upon completion of reclamation actions. The environmental safety monitoring model, simulating the operation of technical facilities and engineering systems of Salaryevo landfill, meets the requirements of "green" technologies against the comfort and safety criteria applicable in an urban area located near a landfill.

KEYWORDS: monitoring, atmosphere, landfill, waste disposal, forecasts of changes in the condition, environment, environmental safety

FOR CITATION: Kovrigin A.A., Slesarev M.Yu. Ecological monitoring of the atmosphere close to Salaryevo landfill. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):589-602. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.589-602 (rus.).

Corresponding author: Artur A. Kovrigin, arturkovrigin62@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Совместная программа наблюдения и оценки распространения загрязнителей воздуха на большие расстояния в Европе (ЕМЕП), действующая в рамках Конвенции, является главным инструментом международного сотрудничества в области решения проблем трансграничного загрязнения воздуха, основанная на научных принципах. В настоящее время особое внимание в рамках ЕМЕП уделяется воздействию на здоровье человека небольших атмосферных частиц, тропосферного озона, NO₂, стойких органических загрязнителей (СОЗ) и тяжелых металлов (ТМ). Кроме того, важное значение придается таким вопросам, как ущерб, причиняемый озоном, лесам и сельскохозяйственным культурам; эвтрофикация рек, озер и региональных морей; а также комплексное воздействие кислотных осадений, ТМ и СОЗ на почву, растительность и водные экосистемы, включая их восстановление по мере сокращения выбросов («Стратегия ЕМЕП на 2000–2009 годы» ЕВ.AIR/GE.1/2000/5). В структуре ЕМЕП функц ионируют четыре центра: Координационный химический центр (КХЦ); Метеорологический синтезирующий центр – Восток (МСЦ–В); Метеорологический синтезирующий центр – Запад (МСЦ–З); Центр по разработке моделей для комплексной оценки (ЦМКО).

Координационный химический центр базируется в Норвежском институте исследований атмосферного воздуха с начала программы (1979 г.). Главные задачи КХЦ–ЕМЕП состоят в том, чтобы координировать программу измерений ЕМЕП. *Метеорологический синтезирующий центр – Восток* (Москва, Россия) как международный центр ЕМЕП действовал с 1979 по 1995 гг. МСЦ–В занимался оценкой трансграничного переноса кислотных компонентов (SOx и NOx). С 1995 г. МСЦ–В сосредоточился на исследовании и моделировании переноса на дальние расстояния ТМ и СОЗ и отвечает за развитие и использование математических моделей переноса ТМ и СОЗ. Моделирование переноса загрязнителей требует де-

тального знания механизмов поступления ТМ и СОЗ в атмосферу, процессов их миграции и накопления в различных природных средах. В основных моделях должна быть обеспечена оценка регионального, полусферного и межконтинентального атмосферного переноса ТМ и СОЗ. *Метеорологический синтезирующий центр – Запад* располагается в Норвежском метеорологическом институте с начала программы ЕМЕП (1979 г.). Ключевая задача МСЦ–З заключается в том, чтобы моделировать трансграничные переносы подкисляющих соединений, фотохимических окислителей и твердых частиц. Первоначально двухмерная модель Лагранжа применялась только для серы, но позже были подключены компоненты азота и поверхностный озон. В 1999 г. Исполнительный орган Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния решил включить объединенную оценку в основные действия ЕМЕП и образовать *Центр по разработке моделей для комплексной оценки*. Деятельность ЦМКО сопряжена с анализом сценариев для повышения эффективности сокращения окисления, эвтрофикации, тропосферного озона и связанных явлений. Распределение основных направлений ЕМЕП между центрами: эмиссионная база данных (МСЦ–З); мониторинг (КХЦ); моделирование (МСЦ–В, МСЦ–З, ЦМКО). В научных трудах большое внимание уделяется мониторингу и моделированию загрязнения атмосферного воздуха. Однако мало публикаций, в которых учитываются выбросы в ЖКХ и бытовом секторе, от большинства площадных и природных источников, аварий, пожаров, мусорных свалок и полигонов захоронения отходов.

Объектом исследования в данной научной работе является атмосферный воздух над территорией закрытого полигона твердых промышленных и бытовых отходов (ТПБО) «Саларьево», расположенного в Ленинском районе Московской области южнее п. Саларьево. Предмет изучения — модель экологического мониторинга изменения характеристик атмосферы вблизи полигона «Саларьево». Цель исследования — разработка и научное обо-

снование соответствия математических моделей экологической безопасности функционирования технических средств и инженерных систем города «зеленым» технологиям среды жизнедеятельности по критериям природоподобия, биопозитивности, комфортности и безопасности. Саларьевская свалка расположена в Ленинском районе Московской области южнее поселка Саларьево¹. В непосредственной близости от полигона находятся населенные пункты пос. Мосрентген и д. Дудкино. Площадь полигона в границах отвода составляет 59 га. Полигон граничит: на юго-востоке с охранной зоной линий электропередачи (ЛЭП); на востоке с ЛЭП 15 кВ, с Николо-Хованским кладбищем; на севере и северо-западе с сельхозугодьями агрокомбината «Московский», на юге с сельхозугодьями племзавода «Коммунарка». Полигон организован в 1963 г. на месте отработанного месторождения покровных суглинков в карьере глубины 1–3 м. В настоящее время хранение отходов осуществляется по высотной схеме. Средняя относительная отметка верхнего склада составляет 29,0 м. На полигоне в период с 1963 по 1979 гг. складировались промышленные отходы предприятий Москвы и Видного и твердые бытовые отходы (ТБО) близлежащих городов и поселков. Затем полигон был закрыт, а с 1993 г. Саларьевский полигон находится в ведении МГУП «Промотходы», эксплуатация ведется по высотной схеме [1–3]. Проектом предусмотрена рекультивация пустырей действующего полигона с одновременной работой по высотной схеме на участке, северная граница которого находится на расстоянии более 500 м от пос. Саларьево, что соответствует нормам создания санитарно-защитной зоны (СЗЗ) от жилой застройки до полигона. В соответствии с заданием на проектирование годовой объем вывоза отходов составляет 775 024 т, в том числе 700 000 т инертных промышленных отходов (ПО) и 75 024 т ТБО. Отходы вывозятся на полигон в количестве 48 наименований, средней объемной массой 1,2 т/м³. Общий объем отходов, поступающих на полигон за год, — 107 847 м³ + 583 333 м³ = 691 180 м³. Объем грунта для изоляции ТПБО составит (107 847 м³/год · 0,15) / 1,15 = 14 067 м³. При отсутствии грунта в качестве изо-

ляционного материала могут быть использованы инертные отходы мелких фракций [4–6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные государственной статистической отчетности на современном уровне априори неполны и отражают лишь некоторый срез ситуации с выбросами на основе знаний о выбросах 2000-х годов. Это служит отправной точкой для совершенствования методов и моделей расчета и учета выбросов. На полигоне ТПБО «Саларьево» отбор проб и анализ атмосферного воздуха проводят на содержание соединений, характеризующих процесс биохимического разложения ТПБО и представляющих наибольшую опасность, а именно: азота диоксид, оксид азота, оксид углерода, диоксид серы, аммиак, сероводород, метан, нефть бензин, бензол, ксилол, толуол, этилбензол, фенол, бенз(а)пирен, формальдегид, хлорбензол, трихлорметан, четыреххлористый углерод, двуокись углерода (диоксид углерода)² [7–9]. Приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 06.06.2017 № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» (зарегистрировано в Минюсте РФ 10.08.2017 № 47734)³ установлен новый механизм расчета концентрации вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух, в том числе при утверждении нормативов предельно допустимых выбросов (ПДВ) для стационарных источников по проекту ПДВ [7].

Согласно ГОСТ Р 56060-2014 «Производственный экологический мониторинг» воздействие полигона на окружающую среду возможно на: стадии работ по рекультивации полигона — воздействие на окружающую среду временное; стадии завершения работ по благоустройству^{4, 5}.

Программа предусматривает контроль объектов, химических и физических факторов, представляющих потенциальную опасность для человека и окружающей среды, на период эксплуатации. Схема расположения пунктов наблюдения, где предлагается мониторинг, представлена на карте-схеме (рис. 1).

Биогаз содержит компоненты, оказывающие вредное воздействие на здоровье человека, которые могут значительно превышать установленные

¹ Технический отчет по результатам инженерно-экологических изысканий для подготовки проектной документации Рекультивация полигона Саларьево (свидетельство АО «МосводоканалНИИпроект» № 01-И-№ 1487-6 от 25.08.2015) 964-16-Д1891-ИЭИ. 2018.

² Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от мусоросжигательных и мусороперерабатывающих заводов : утв. АКХ им. К.Д. Панфилова. М., 1987.

³ Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от установок малой производительности по термической переработке твердых бытовых отходов и промотходов. М. : ВНИИгаз, 1999.

⁴ СП 320.1325800.2017. Полигоны для коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация. М. : Стандартинформ, 2018.

⁵ Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов. М., 2004.

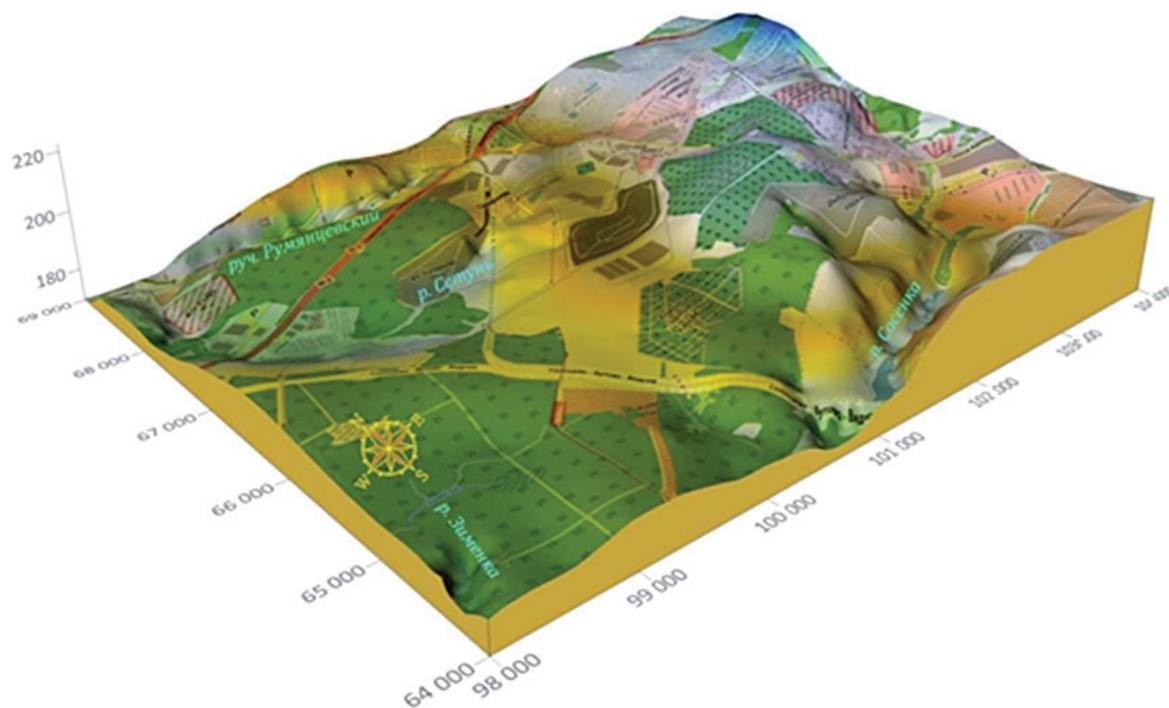


Рис. 1. Орографическая схема расположения полигона «Саларьево» (вертикальный зум увеличен)

Fig. 1. The orographic image of Salaryevo waste landfill (vertically zoomed)

для них значения в атмосферном воздухе. По влиянию на здоровье человека и животных компоненты биогаза можно разделить на следующие группы: инертные, к ним относятся метан, азот, водород; и токсичные — двуокись и окись углерода, ароматические углеводороды, сероводород, меркаптаны, хлорсодержащие углеводороды⁶ [10–12].

Автоматическая станция контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) «Саларьево» была установлена в конце декабря 2013 г. на территории Центра оптовой торговли «Международный» (д. Николо-Хованская, д. уч. 96/1) и находится под воздействием различных техногенных источников загрязнения (полигон «Саларьево» и грузовики). АСКЗА «Саларьево» попадает под влияние «Саларьево» в северном и восточном секторах движения воздушных масс. На станции — непрерывный круглосуточный режим мониторинга.

В 2014 г. средние концентрации загрязняющих веществ по станции не превышали установленных нормативов (Приложение 1) и составили: оксида углерода — 0,1 мг/м³, азота оксида — 0,2 мг/м³, азота диоксида — 0,5 мг/м³, аммиака — 0,1 мг/м³, РМу — 0,5 мг/м³. Концентрации веществ, по которым не установлена среднесуточная норма, составили: сероводород — 0,001 мг/м³, сумма углеводородных соединений — 3,95 мг/м³, метан — 3,19 мг/м³, углеводороды за вычетом метана — 0,76 мг/м³. Указанные концентрации суммы углеводородов и метана в 2,5 раза превышают сред-

негодовые значения по городу, концентрации углеводородов за вычетом метана в 3,5 раза [13–15].

Среднесуточные концентрации превысили допустимую норму по диоксиду азота в течение 19 дней (5 % времени) и по оксиду азота в течение 7 дней (2 % времени), что не превышает аналогичных показателей на других АСК в аналогичных функциональных зонах. Максимальные среднесуточные концентрации диоксида азота и оксида азота составили 2,3 и 2,9 мг/м³ соответственно. В аналогичных функциональных зонах (селитебных территориях, находящихся под влиянием различных техногенных источников) в рассматриваемый период максимальные среднесуточные концентрации диоксида азота колебались от 1,3 до 4,2 мг/м³, оксида азота — от 4,0 до 10,6 мг/м³. Частота превышений предельно-допустимой концентрации (далее — ПДК) по диоксиду азота за период варьировала от 3,6 до 47,7 %, по оксиду азота — от 3,6 до 13,2 %. Наибольшая повторяемость превышения максимального разового норматива отмечена по сероводороду и составила 0,2 % от времени за указанный период (максимальный — 3,1 мг/м³ ПДК). Отмечены также единичные случаи превышения ПДК в период неблагоприятных метеорологических условий по оксиду азота в 1,4 раза, по диоксиду азота в 1,1 раза. Концентрация метана превышала расчетный безопасный уровень воздействия в 2,1 раза (при северном направлении ветра).

Проведен анализ наблюдаемых средних концентраций загрязняющих веществ от направления ветра.

⁶ Программный комплекс «Эколог» для расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе : Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2020612125 от 18.02.2020.

Увеличение средней концентрации всех измеряемых параметров зафиксировано в среднем в 1,2–2,2 раза при переносе воздушных масс северного и северо-восточного секторов. Увеличение концентраций метана, общих углеводородов и углеводородов за вычетом метана отмечено также при северо-западном направлении ветра, что, вероятно, связано с локальными источниками воздействия [16–18].

В соответствии с РД 52.04.667-2005 «Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения» уровень загрязнения атмосферного воздуха на территории, прилегающей к АСКЗА «Саларьево», оценивается как «повышенный» за счет стандартного показателя (SI), равного 3,1 для сероводорода (рис. 2).

Табл. 1. Среднемесячная и годовая температура воздуха

Table 1. Average monthly and yearly air temperature

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год Year
-6,9	-7,2	-1,6	6,5	13,1	16,9	19,1	16,9	ПД	5Д	-1,7	-5,6	5,5

Табл. 2. Абсолютная минимальная температура воздуха, °С

Table 2. Absolute minimum air temperature, °C

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год Year
-35,2	-31,1	-29,3	-27,4	-12,5	-4,6	0,2	4,1	2,8	-4,3	-14,1	-24,0	-35,2
1987	1989	1989	1997	1998	1995	2004	1992	1984	1996	2003	1989	1987

Табл. 3. Абсолютная максимальная температура воздуха, °С

Table 3. Absolute maximum air temperature, °C

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год Year
8,0	7,8	17,4	25,6	33,3	33,0	38,4	37,3	29,2	24,1	14,0	9,8	38,4
2007	1989	2007	2000	2007	1998	2010	2010	1995	1999	2010	2008	2010

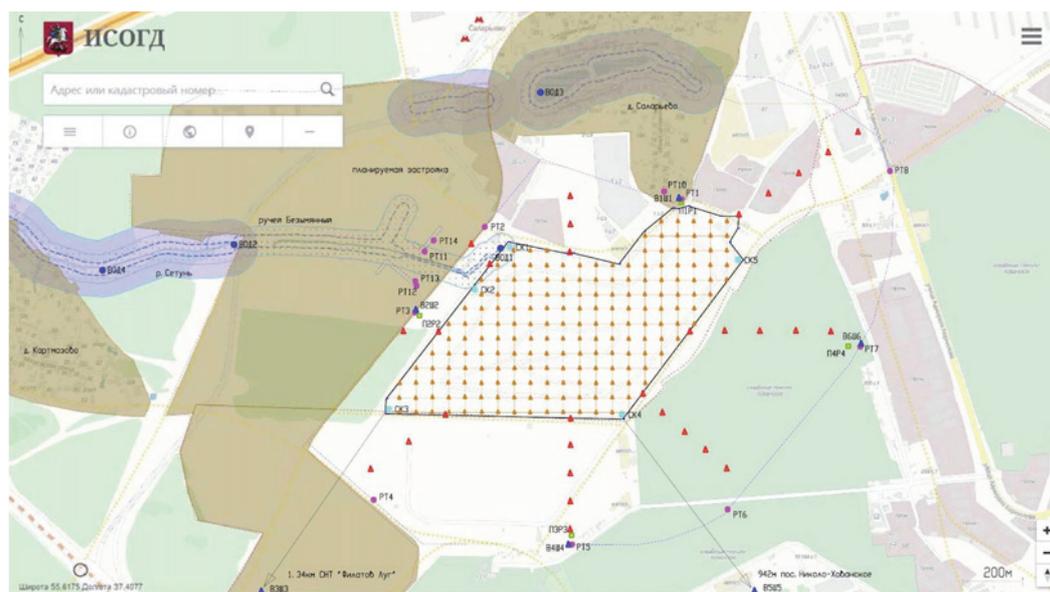


Рис. 2. Схема расположения пунктов газозадушного мониторинга характеристик атмосферы в районе Саларьевского полигона

Fig. 2. Points of air gas monitoring of atmosphere characteristics close to Salaryevo landfill

Краткая климатическая характеристика местности, где расположен объект: рекультивация Саларьевского полигона подготовлена по наблюдениям Немчиновой агрометеорологической станции за тридцатилетний период с 1981 по 2010 гг. Результаты отражены в табл. 1–3.

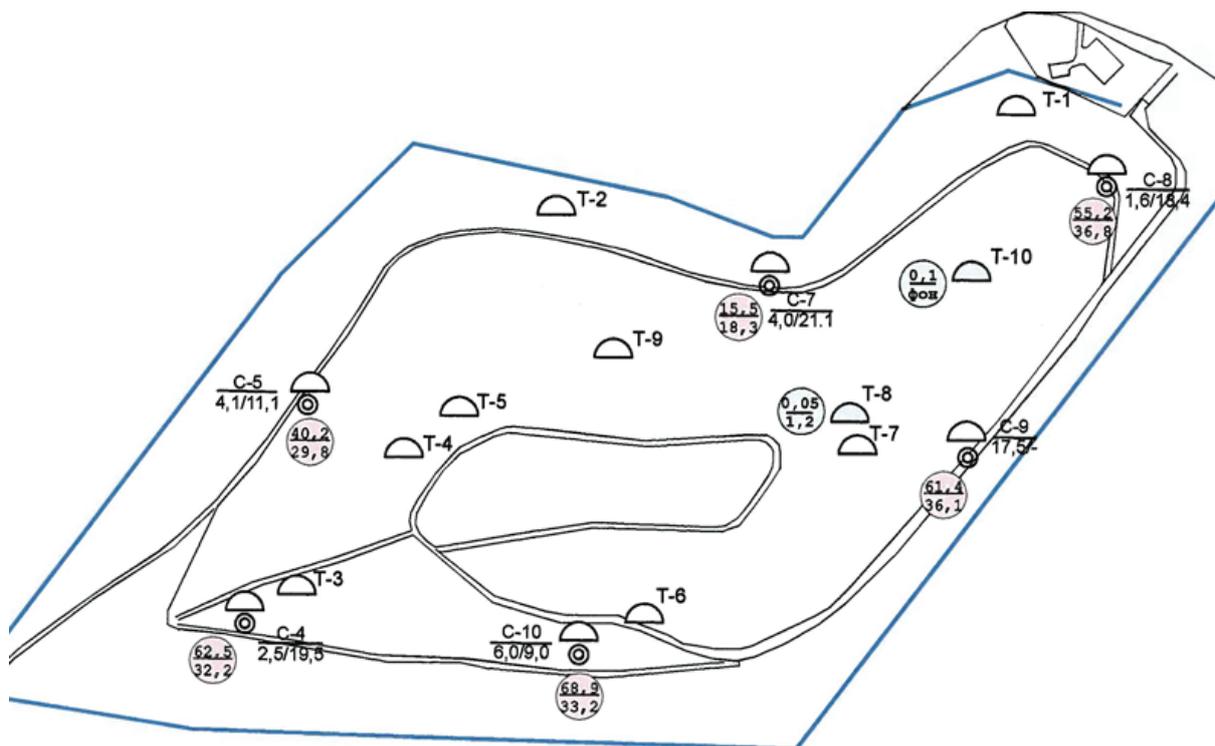
Как видно, абсолютный максимум +38,4 отмечен за период 1944–2010 гг., абсолютный минимум –43,0 за период 1944–2010 гг. Средний максимум

самого жаркого месяца составил +24,3 °С, среднее значение самого холодного периода –11,8.

Схематическое обозначение точек замеров показателей среды представлено на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существующие в настоящее время методики расчета [19–21] позволяют получить оценки выбросов загрязняющих веществ только с соответ-



Условные обозначения:

- $\frac{C-10}{6,0/9,0}$ — инженерная скважина ООО «Ленстрой», в знаменателе — вместимость по супесчаному или суглинистому грунту, м/вместимость по бытовому мусору, м;
- $\frac{68,9}{33,2}$ — в числителе — максимальное содержание метана в приземном воздухе скважин, % об.; в знаменателе — максимальное содержание углекислого газа в приземном воздухе скважин, % об.;
- D — замеры выбросов биогаза над устьем скважины;
- D-T-7 — замеры выбросов биогаза под колпаком, установленным на уровне дневной поверхности;
- D-T-8 — замеры выбросов биогаза под вытяжкой, установленной в приямок на глубине 0,4 м;
- $\frac{0,05}{1,2}$ — в числителе — максимальное содержание метана, измеренное под колпаком в приямок, % об.; в знаменателе — не более, содержание углекислого газа, измеренное под колпаком в приямок, % об.

The legend:

- $\frac{C-10}{6,0/9,0}$ the engineering borehole owned by Lenstroy open joint stock company; the denominator has the value of the sandy loam and loam soil capacity, m / household waste capacity, m;
- $\frac{68,9}{33,2}$ the numerator has maximal methane content in the ground air of boreholes, % vol.; the denominator has maximal carbon dioxide gas content in the ground air of boreholes, % vol.;
- D measurements of biogas emissions above the borehole mouth;
- D-T-7 measurements of biogas emissions under the dome, installed at the level of the daylight surface;
- D-T-8 measurements of biogas emissions under the air extraction system in the pocket at a depth of 0.4 m;
- $\frac{0,05}{1,2}$ the numerator has maximal methane content measured in the pocket under the dome, % vol.; the denominator has maximal carbon dioxide gas content measured in the pocket under the dome, % vol.

Рис. 3. Схема расположения скважин для газогеохимического исследования грунтов и точек замера выбросов биогаза на дневную поверхность на Саларьевском полигоне

Fig. 3. Layout of wells used for the geochemical research on soils and measurement points of biogas emissions to the daylight surface at Salaryevo landfill

ствующей степенью неопределенности. Каждую оценку следует рассматривать как некоторое приближение к истинному значению. Неформальное (критическое) отношение к информации по выбросам будет способствовать повышению ее точности и улучшению качества инвентаризации. На полигоне «Саларьево» биогаз выбрасывается в атмосферу через толщу отходов и изолирующих слоев почвы, загрязняя ее. Поступление биогаза с поверхности полигона в атмосферный воздух происходит равномерно, без заметных колебаний его количественных и качественных характеристик [22–24]. На количественные характеристики выбросов загрязняющих веществ от полигонов влияет большое количество факторов (рабочая (активная) площадь полигона,

период эксплуатации полигона, количество захороненных отходов, мощность слоя складываемых отходов, соотношение количеств ввозимых бытовых и промышленных отходов, морфологический состав ввозимых отходов и их влажность, содержание органической составляющей в отходах и др.) [16]. Для определения микрокомпонентов биогаза в соответствии с протоколами были отобраны пробы свалочного газа из двух глубоких скважин, расположенных в центральной части полигона. Результаты лабораторных испытаний представлены в табл. 4.

При отсутствии систем сбора и дегазации метан может распространяться под землей на большие расстояния от рабочего органа полигона, накапливаться в подвалах, технических подпольях зданий

Табл. 4. Основной состав биогаза, извлекаемого из полигона «Саларьево»

Table 4. Principal composition of biogas extracted from Salaryevo landfill

Название вещества Substance	Массовая концентрация, мг/м ³ Mass concentration, mg/m ³	
	Скважина № 1-2018 Borehole № 1-2018	Скважина № 2-2018 Borehole № 12-2018
Метан* / Methane*	68,9 % об. / % vol.	
Углекислый газ* / Carbon dioxide gas*	33,2 % об. / % vol.	
Моноксид углерода / Carbon monoxide	2331	2805
Диоксид азота / Nitrogen dioxide	948	932
Диоксид серы / Sulphur dioxide	816	694
Толуол / Toluene	7516	7702
Аммиак / Ammonia	4479	4506
Ксилол / Xylol	4897	4591
Формальдегид / Formaldehyde	904	819
Этилбензол / Ethyl benzene	1013	789
Сероводород / Hydrogen sulfide	179	194

Примечание: * — максимальные концентрации по данным скважинных газогеохимических исследований ООО «РНЦ».

Note: * — means maximal concentrations identified in the course of geochemical studies of boreholes conducted by RNTs Open Joint Stock Company.

Табл. 5. Сводная таблица данных скважинных газогеохимических исследований

Table 5. Consolidated table of data on borehole geochemical studies

Номер колодца Borehole number	CH ₄ , макс. % об. CH ₄ , max % vol.	H ₂ , макс. % об. H ₂ , max % vol.	CO ₂ , макс. % об. CO ₂ , max % vol.	O ₂ , мин. % об. O ₂ , min % vol.	Дебит метана из скважины, м ³ /ч Methane extracted from the well, m ³ /h
С-4	62,5	0,012	32,2	0,8	0,071
С-5	40,2	<10 ⁻³	29,8	0,3	0,036
С-7	15,5	0,001	18,3	4,8	0,016
С-8	55,2	0,010	36,8	0,8	0,054
С-9	61,4	<10 ⁻³	36,1	0,3	0,073
С-10	68,9	<10 ⁻³	33,2	0,4	0,083

и сооружений, трубопроводах, тоннелях, создавая опасность возгорания и взрыва газа.

В сводной табл. 5 приведены обобщенные данные скважинных газеохимических исследований — максимальное (по разрезу) содержание компонентов биогаза и кислорода в атмосфере каждой скважины, расчетные значения потоков метана на дневную поверхность из этих скважин, а также емкость насыпи со строительным мусором, емкость полигонов (бытовых отходов).

Лабораторные исследования проб атмосферного воздуха проводятся на постах наблюдения, расположенных на полигоне, и на границе СЗЗ в зоне влияния полигона⁷: пост № 1 — центральная часть территории полигона; пост № 2 — д. Саларьево, на границе жилой застройки; пост № 3 — д. Картмазово, на границе жилой застройки; пост № 4 — д. Николо-Хованская, на границе жилой застройки⁸. Согласно заключению ФГБУ «ЦГЭ» в Москве (№ 1157-07-02 от 30.03.2018) качество атмосферного воздуха на постах наблю-

дения № 2–4 за 2017 г. по данным исследуемых показателей загрязняющих веществ соответствует требованиям СанПиН 2.1.6.1032-01 «Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест». Качество воздуха в контрольно-пропускном пункте № 1 (центральная часть территории полигона) соответствует требованиям ГН 2.2.5.1313-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны» и СП 2.1.7.1038-01 «Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов твердых бытовых отходов» (табл. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Мониторинг содержания паров ртути в атмосферном воздухе проводился на уровне дыхательных путей человека на высоте 1,3–1,5 м на границе полигона и его СЗЗ в соответствии с розой ветров с расстояния 100, 200, 300, 400 м от границ полигона. Отбор проб воздуха осуществлялся один раз в квартал в теплый

Табл. 6. Статистические характеристики загрязняющих веществ по данным АСКЗА «Саларьево»

Table 6. Statistical characteristics of pollutants according to Salaryevo automatic air pollution monitoring stations

Параметр Parameter	Средняя концентрация, мг/м ³ Average concentration, mg/m ³	Средняя концентрация, доли ПДК Average concentration, share of maximal allowable concentration	Максимальная разовая концентрация, мг/м ³ Maximum one-time concentration, mg/m ³	Максимальная разовая концентрация, доли ПДК Maximum allowable one-time concentration, share of maximum allowable one-time concentration	Максимальная среднесуточная концентрация, мг/м ³ Maximal daily average concentration, mg/m ³	Максимальная среднесуточная концентрация, доли ПДК Maximal daily average concentration, share of maximal allowable concentration
CO Carbon oxide	0,28	0,09	1,9	0,38	1,25	0,42
N ₂ O ₅ Nitrogen oxide	0,012	0,20	0,571	1,43	0,174	2,90
NO ₂ Nitrogen dioxide	0,021	0,52	0,2184	1,09	0,093	2,33
CH Benzol	0,76	—	28,06	—	3,28	—
CH ₄ Methane	3,19	—	104,09	2,08	11,05	—
CH ₃ Methyl	3,95	—	108,82	—	12,91	—
H ₂ S Hydrogen sulfide	0,001	—	0,0244	3,05	0,0058	—

⁷ Мониторинг атмосферного воздуха (ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Амурской области»). URL: http://www.sge-amur.ru/information/?p=338&show_year=2011. Дата подачи заявки: 20.02.2022.

⁸ Аккредитованная испытательная лаборатория ООО «МОНИТОРИНГ». URL: <http://www.ooo-monitoring.ru/products/proba/passive-pr>. Дата подачи заявки: 20.02.2022.

период года в сухую погоду. При отборе проб на постах наблюдения фиксировали направление и скорость ветра, температуру воздуха, влажность и осадки. Оптимальные условия отбора проб: отсутствие осадков и скорость ветра не более 95 % безопасности (7 м/с). Пробы отбирали либо аспирационным методом, либо анализировали непосредственно на месте с помощью портативного газоанализатора. Результаты отбора проб представлены в табл. 7–9.

Скорость ветра 5 % безопасности составляет 6 м/с. Поправка на рельеф местами –1. Коэффициент стратификации 140.

Многолетние данные розы ветров для зимнего, летнего и годового периодов представлены на рис. 4.

Определили максимальные разовые пробы (4 раза в сутки) и произвели расчет среднесуточного содержания метана, аммиака, оксида углерода, диоксида азота, оксида азота, оксида серы, сероводорода, бензола, ксилола, толуола, этилбензола, фенола, формальдегида, хлорбензола, трихлорметана, четыреххлористого углерода в отобранных пробах [25, 26]. Качество работ по мониторингу атмосферного воздуха соответствовало требованиям

Табл. 7. Среднемесячная и годовая скорость ветра, м/с

Table 7. Average monthly and yearly wind velocity, m/s

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год Year
2,9	2,9	2,9	2,6	2,5	2,3	2,1	2,1	2,3	2,7	2,8	2,9	2,6

Табл. 8. Повторяемость направлений ветра и штилей, %

Table 8. Repeatability of wind directions and calms, %

Месяц Month	Север North	К северо-востоку North-eastwards	Восток East	Юго-восток South-East	Юг South	Юго-запад South-West	Запад West	Северо-запад North-West	Спокойствие Calm
I	8	3	6	10	22	18	18	15	5
II	9	4	9	12	22	14	15	15	5
III	7	3	10	15	26	14	13	12	6
IV	11	6	12	13	23	11	11	13	7
V	15	7	10	9	20	10	14	15	8
VI	15	7	9	9	17	10	16	17	7
VII	16	7	8	9	17	9	14	20	9
VIII	14	6	9	7	17	11	18	18	11
IX	12	5	8	9	21	12	17	16	10
X	9	3	6	10	25	15	19	13	6
XI	8	4	8	12	27	15	15	11	4
XII	8	3	7	12	25	16	16	13	4
Год / Year	11	5	8	11	22	13	15	15	7

Табл. 9. Расчетные скорости ветра по направлениям, м/с

Table 9. Estimated wind velocities by directions, m/s

Месяц Month	Север North	К северо-востоку North-eastwards	Восток East	Юго-восток South-East	Юг South	Юго-запад South-West	Запад West	Северо-запад North-West
Январь January	2,7	2,7	3,0	3,3	2,8	2,8	2,6	2,6
Июль July	2,3	3,2	2,2	2,5	2,2	2,2	2,1	2,2

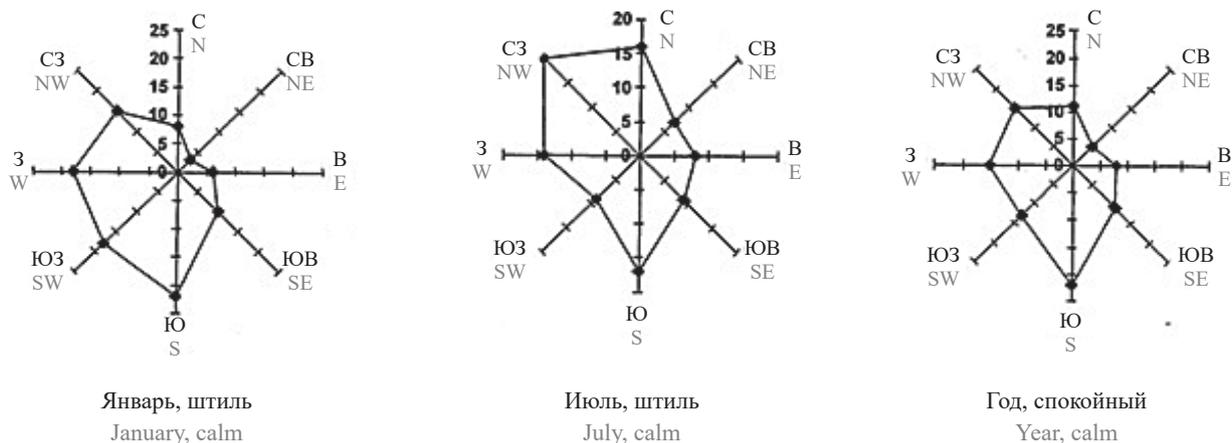


Рис. 4. Роза ветров за зимний, летний и годовой периоды. Повторяемость направления ветра и штиля, %, в пос. Немчиновка возле полигона «Саларьево»

Fig. 4. Wind rose for winter, summer and yearly periods. Repeatability of wind directions and calms, %, in Nemchinovka village near Salaryevo landfill

Федерального закона РФ от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», Федерального закона РФ от 30.03.1999 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», Федерального закона РФ от 04.05.1999 № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха», СанПиН 2.1.6.1032-01 «Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест», ГОСТ 17.2.3.01-86 «Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества атмосферного воздуха населенных мест», ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Гигиенические нормативы», РД 52.04.186-89 «Руководство по контролю загрязнения атмосферы».

В ходе проведенного исследования сделаны следующие выводы.

1. На полигоне «Саларьево» основными источниками загрязнения атмосферного воздуха на период прокладки подземных коммуникаций являются работа строительной техники и большегрузного транспорта, земляные и погрузочно-сварочные работы. Продолжительность работы — 4 месяца. Фоновые концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе ниже ПДК.

2. При этом в атмосферный воздух выделяется 11 вредных веществ, характерных для работающих двигателей внутреннего сгорания, сварки и пыления. Это: азота диоксид, оксид азота, диоксид серы, сажа, оксид углерода, оксид железа, марганец и его соединения, соединения фтора, керосин, нефтяной бензин, неорганическая пыль. Расчетный валовый выброс загрязняющих веществ в атмосферу за период строительства 4 месяца составит 0,8576 т, суммарная максимальная мощность единовременного выброса — 1,083 г/с.

3. Учитывая незначительное время проведения работ, расчеты приземных концентраций при осуществлении строительных работ по оценке параметра F оказались нецелесообразными, приземные концентрации по всем ингредиентам не превысят 0,1 ПДК. Ухудшение качества атмосферного воздуха в период строительства будет незначительным, избыточного загрязнения не будет.

4. При эксплуатации водопровода отрицательного воздействия на атмосферный воздух не будет. Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха при работе очистных сооружений являются: автотранспорт, подвозящий реагенты и мусоровозы, а также работа самих очистных сооружений.

5. В атмосферный воздух выделяется 7 вредных веществ: диоксид азота, оксид азота, сажа, диоксид серы, оксид углерода, нефтяной бензин, керосин. Расчетный валовый выброс загрязняющих веществ в атмосферу при эксплуатации составит 0,044 т/год, суммарная максимальная мощность единовременного выброса — 0,086 г/с.

6. Согласно оценке параметра F по ОНД-86, расчет приземных концентраций нецелесообразен. Значения не превысят 0,1 ПДК. Из этого следует, что при предложенном в проекте размещении источников загрязняющих веществ в атмосферу на территории фильтрационно-очистных сооружений Саларьевского полигона значения приземных концентраций вредных веществ в режиме эксплуатации будут ниже нормативных уровней.

7. Модель мониторинга экологической безопасности функционирования технических средств и инженерных систем полигона «Саларьево» соответствует «зеленым» технологиям среды жизнедеятельности по критериям комфортности и безопасности городской территории вблизи полигона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Теличенко В.И., Ройтман В.М., Слесарев М.Ю., Щербина Е.В. Основы комплексной безопасности строительства. М. : Изд-во АСВ, 2011. 168 с.
2. *Telichenko V.I., Slesarev M.U., Kuzovkina T.V.* The analysis of methodology of the assessment and expected indicators of ecological safety of atmospheric air in the Russian Federation for 2010–2020 years // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 153. Pp. 736–740. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.235
3. *Telichenko V.I., Slesarev M.U., Kuzovkina T.V.* The analysis expected indicators of ecological safety of atmospheric air in the Moscow for 2010–2020 years // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 153. Pp. 731–735. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.234
4. *Ковригин А.А., Слесарев М.Ю.* Модель изменения гидротехнических характеристик территории полигона твердых промышленных и бытовых отходов // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. № 6. С. 770–780. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.770-780
5. *Балакин В.В., Сидоренко В.Ф., Слесарев М.Ю., Антюфеев А.В.* Формирование средозащитных объектов озеленения в градоэкологических системах // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 8. С. 1004–1022. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1004-1022
6. *Двиганина О.В.* Разработка методики нормирования выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух применительно к объектам строительной индустрии : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград : Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2012.
7. *Алтынбаев Р.Б., Гафуров А.С., Шайхутдинова А.А.* Автоматизация системы экологического мониторинга промышленных городских комплексов с применением спутниковых технологий GPS/ГЛОНАСС // *Экология и промышленность России*. 2014. № 12. С. 17–19. DOI: 10.18412/1816-0395-2014-12-17-19
8. *Петров С.К., Патрушева Т.Н., Олейников А.Ю., Матвеев П.В.* Мероприятия, снижающие негативное воздействие ликвидации отходов на окружающую среду // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № S7. С. 471–483. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-4-7-471-483
9. *Сауц А.В.* Прогнозирование экологических последствий загрязненности воздуха свалочным газом в жилой застройке // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2018. Т. 26. № 3. С. 354–366. DOI: 10.22363/2313-2310-2018-26-3-354-366
10. *Сауц А.В., Ерегина С.В.* Прогнозирование экологических последствий загрязнения атмосферного воздуха свалочным газом в жилых зданиях // *Сб. ст. IV Междунар. науч.-практ. конф.* 2018. С. 18–22.
11. *Алешина Т.А.* Геоэкологическое моделирование воздействий биогаза полигонов твердых бытовых отходов на окружающую среду : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : Московский государственный строительный университет, 2011. 115 с.
12. *Подлинский И.И.* Эколого-геологическая характеристика полигонов бытовых отходов и разработка рекомендаций по рациональному природопользованию : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб. : Санкт-Петербургский государственный университет, 2010. 204 с.
13. *Slesarev M.* Modeling and formation of environmental safety management systems of construction technologies // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 258. P. 09084. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809084
14. *Lamb R.G., Seinfeld J.H.* Mathematical modeling of urban air pollution. General theory // *Environmental Science & Technology*. 1973. Vol. 7. Issue 3. Pp. 253–261. DOI: 10.1021/es60075a006
15. *Finzi G., Nunnari G.* Air quality forecast and alarm systems. Chapter 16A of P. Zannetti (ed.) // *Air Quality Modelling*. 2005. Vol. 2.
16. *Daly A., Zannetti P.* Air pollution modeling — an overview. Chapter 2. Ambient air pollution, P. Zannetti, D. Al-Ajmi, S. Al-Rashied (ed.). The Arab School for Science and Technology (ASST) and The Enviro-Comp Institute. 2007.
17. *Bărbulescu A., Postolache F.* New approaches for modeling the regional pollution in Europe // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 753. P. 141993. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141993
18. *Leelőssy Á., Molnár F., Izsák F., Havasi Á., Lagzi I., Mészáros R.* Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review // *Open Geosciences*. 2014. Vol. 6. Issue 3. DOI: 10.2478/s13533-012-0188-6
19. *Cimorelli A.J., Perry S.G., Venkatram A., Weil J.C., Paine R.J., Wilson R.B. et al.* AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part I: General model formulation and boundary layer characterization // *Journal of Applied Meteorology*. 2005. Vol. 44. Issue 5. Pp. 682–693. DOI: 10.1175/jam2227.1
20. *Todorova A., Syrakov D., Gadjhev G., Georgiev G., Ganev K.G., Prodanova M. et al.* Grid computing for atmospheric composition studies in Bulgaria // *Earth Science Informatics*. 2010. Vol. 3. Issue 4. Pp. 259–282. DOI: 10.1007/s12145-010-0072-1
21. *Cheng W.C., Liu C.-H.* Large-eddy simulation of flow and pollutant transports in and above two-dimensional idealized street canyons // *Boundary-Layer Meteorology*. 2011. Vol. 139. Issue 3. Pp. 411–437. DOI: 10.1007/s10546-010-9584-y
22. *Chen G., Sun Y., Xu Zh., Shan X., Chen Zh.* Assessment of shallow groundwater contamination resulting from a municipal solid waste landfill — a case

study in Lianyungang, China // *Water*. 2019. Vol. 11. Issue 12. P. 2496. DOI: 10.3390/w11122496

23. Popovych V., Telak J., Telak O., Malovanyy M., Yakovchuk R., Popovych N. Migration of hazardous components of municipal landfill leachates into the environment // *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Vol. 21. Issue 1. Pp. 52–62. DOI: 10.12911/22998993/113246

24. Randazzo A., Asensio-Ramos M., Melián G.V., Venturi S., Padrón E., Hernández P.A. et al. Volatile organic compounds (VOCs) in solid waste landfill cover soil: Chemical and isotopic composition vs. degradation processes // *Science of The Total Environment*.

2020. Vol. 726. P. 138326. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138326

25. Milyutina N., Osmolovskaya N., Politaeva N. Migration of heavy metal in the soil-plant system in the territory adjacent to the MSW landfill // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 403. Issue 1. P. 012166. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012166

26. Luo H., Zeng Y., Cheng Y., He D., Pan X. Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 703. P. 135468. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135468

Поступила в редакцию 29 марта 2022 г.

Принята в доработанном виде 20 апреля 2022 г.

Одобрена для публикации 29 апреля 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: Артур Альбертович Ковригин — аспирант кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1032608; arturkovrigin62@yandex.ru;

Михаил Юрьевич Слесарев — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 631310, Scopus: 6507608631, ResearcherID: AAA-8053-2019, ORCID: 0000-0003-4528-2817; Slesarev@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Ковригин А.А. — сбор исходных данных для написания научной работы, формирование структуры статьи согласно шаблону, доработка текста, итоговые выводы.

Слесарев М.Ю. — научное руководство, концепция исследования, структурирование методологии, подготовка итоговых выводов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Telichenko V.M., Roytman M.U., Slesarev E.V., Shcherbina E.V. *Bases of complex safety of construction : the monograph*. Moscow, ASV Publishing House, 2011; 168. (rus.).

2. Telichenko V.I., Slesarev M.U., Kuzovkina T.V. The analysis of methodology of the assessment and expected indicators of ecological safety of atmospheric air in the Russian Federation for 2010–2020 years. *Procedia Engineering*. 2016; 153:736-740. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.235

3. Telichenko V.I., Slesarev M.U., Kuzovkina T.V. The analysis expected indicators of ecological safety of atmospheric air in the Moscow for 2010–2020 years. *Procedia Engineering*. 2016; 153:731-735. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.234

4. Kovrigin A.A., Slesarev M.Yu. A change model of the hydraulic characteristics of the territory occupied by the landfill of solid industrial and domestic waste. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construc-

tion and Architecture]. 2021; 16(6):770-780. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.770-780 (rus.).

5. Balakin V.V., Sidorenko V.F., Slesarev M.Yu., Antyufeev A.V. Formation of environmental protection landscaping facilities in urban ecological systems. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2019; 14(8):1004-1022. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.1004-1022 (rus.).

6. Dvinyanina O.V. *Development of methodology for normalizing emissions of harmful (polluting) substances into the atmospheric air in relation to construction industry objects : abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Volgograd, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering, 2012. (rus.).

7. Altynbayev R.B., Gafurov A.S., Shaikhutdinova A.A. Automation of system of environmental monitoring for industrial agglomeration with the application of satellite-based technologies GPS/GLO-

NASS. *Ecology and Industry of Russia*. 2014; (12):17-19. DOI: 10.18412/1816-0395-2014-12-17-19 (rus.).

8. Sauts A.V. Forecasting the environmental effects of air pollution with landfill gas in residential areas. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2018; 26(3):354-366. DOI: 10.22363/2313-23102018-26-3-354-366 (rus.).

9. Sauts A.V. Forecasting the environmental effects of air pollution with landfill gas in residential areas. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2018; 26(3):354-366. DOI: 10.22363/2313-23102018-26-3-354-366 (rus.).

10. Sauts A.V., Eregina S.V. Forecasting the environmental consequences of atmospheric air pollution by landfill gas in residential buildings. *Collection of articles of the IV International Scientific and Practical Conference*. 2018; 18-22. (rus.).

11. Alyoshina T.A. *Geoecological modeling of the impact of biogas from landfills of solid household waste on the environment : abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences*. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering, 2011; 115. (rus.).

12. Podlipsky I.I. *Ecological and geological characteristics of landfills of household waste and the development of recommendations for rational nature management : dissertation for the degree of Candidate of Geological and mineralogical Sciences*. St. Petersburg, St. Petersburg State University, 2010; 204. (rus.).

13. Slesarev M. Modeling and formation of environmental safety management systems of construction technologies. *E3S Web of Conferences*. 2021; 258:09084. DOI: 10.1051/e3sconf/202125809084

14. Lamb R.G., Seinfeld J.H. Mathematical modeling of urban air pollution. General theory. *Environmental Science & Technology*. 1973; 7(3):253-261. DOI: 10.1021/es60075a006

15. Finzi G., Nunnari G. Air quality forecast and alarm systems. Chapter 16A of P. Zannetti (ed.). *Air Quality Modelling*. 2005; 2.

16. Daly A., Zannetti P. *Air Pollution Modeling – An Overview. Chapter 2. Ambient Air Pollution*, P. Zannetti, D. Al-Ajmi, S. Al-Rashied (ed.), The Arab School for Science and Technology (ASST) and The EnviroComp Institute. 2007.

17. Bărbulescu A., Postolache F. New approaches for modeling the regional pollution in Europe. *Science of the Total Environment*. 2021; 753:141993. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141993

18. Leelössy Á., Molnár F., Izsák F., Havasi Á., Lagzi I., Mészáros R. Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. *Open Geosciences*. 2014; 6(3). DOI: 10.2478/s13533-012-0188-6

19. Cimorelli A.J., Perry S.G., Venkatram A., Weil J.C., Paine R.J., Wilson R.B. et al. AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization. *Journal of Applied Meteorology*. 2005; 44(5):682-693. DOI: 10.1175/jam2227.1

20. Todorova A., Syrakov D., Gadjehev G., Georgiev G., Ganev K.G., Prodanova M. et al. Grid computing for atmospheric composition studies in Bulgaria. *Earth Science Informatics*. 2010; 3(4):259-282. DOI: 10.1007/s12145-010-0072-1

21. Cheng W.C., Liu C.-H. Large-eddy simulation of flow and pollutant transports in and above two-dimensional idealized street canyons. *Boundary-Layer Meteorology*. 2011; 139(3):411-437. DOI: 10.1007/s10546-010-9584-y

22. Chen G., Sun Y., Xu Zh., Shan X., Chen Zh. Assessment of shallow groundwater contamination resulting from a municipal solid waste landfill — a case study in Lianyungang, China. *Water*. 2019; 11(12):2496. DOI: 10.3390/w11122496

23. Popovych V., Telak J., Telak O., Malovanyy M., Yakovchuk R., Popovych N. Migration of hazardous components of municipal landfill leachates into the environment. *Journal of Ecological Engineering*. 2020; 21(1):52-62. DOI: 10.12911/22998993/113246

24. Randazzo A., Asensio-Ramos M., Melián G.V., Venturi S., Padrón E., Hernández P.A. et al. Volatile organic compounds (VOCs) in solid waste landfill cover soil: Chemical and isotopic composition vs. degradation processes. *Science of The Total Environment*. 2020; 726:138326. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138326

25. Milyutina N., Osmolovskaya N., Politaeva N. Migration of heavy metal in the soil-plant system in the territory adjacent to the MSW landfill. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 403(1):012166. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012166

26. Luo H., Zeng Y., Cheng Y., He D., Pan X. Recent advances in municipal landfill leachate: A review focusing on its characteristics, treatment, and toxicity assessment. *Science of the Total Environment*. 2020; 703:135468. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135468

Received March 29, 2022.

Adopted in revised form on April 20, 2022.

Approved for publication on April 29, 2022.

BIONOTES: Artur A. Kovrigin — postgraduate student of the Department of Construction of Thermal and Nuclear Power Facilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1032608; arturkovrigin62@yandex.ru;

Mikhail Yu. Slesarev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction of Thermal and Nuclear Power Facilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 631310, Scopus: 6507608631, ResearcherID: AAA-8053-2019, ORCID: 0000-0003-4528-2817; Slesarev@mgsu.ru.

Authors' contribution:

Artur A. Kovrigin — collection of initial data for writing a scientific work, formation of the structure of the article according to the template, text revision, final conclusions.

Mikhail Yu. Slesarev — scientific guidance, research concept, structuring methodology, preparation of final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК [627.5+624.154]:519.6

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.603-613

Аналитические и численные исследования размывов свайного основания морского причала

Измаил Григорьевич Кантаржи, Александр Григорьевич Гогин,
Александр Васильевич Куприн

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Цель исследования — оценка возможных размывов донного грунта проектируемого причала на свайном основании для обеспечения проектных решений по защите дна от размыва в результате действия ветровых волн и течений.

Материалы и методы. Проанализированы существующие нормативные документы, которые потенциально могли бы быть использованы для расчета размыва у опор свайного основания причальных сооружений. Определены величины размыва грунта вблизи гидротехнических сооружений (ГТС) морского терминала. Выполнено численное моделирование литодинамических процессов на припричальной акватории в условиях действия экстремальных штормов.

Результаты. В ходе анализа метода оценки местного размыва ВСП 33-03-07 пришли к выводу, что данный метод обладает принципиальными недостатками для условий многорядной свайной конструкции и не может гарантировать необходимую точность прогноза. Представлены результаты численного моделирования ветровых волн, течений и литодинамических процессов для исследования величин волнового размыва грунта дна припричальных акваторий морского терминала. Для этого была реализована трехуровневая система взаимосвязанных моделей, включающая модель ветровых волн, модель течений и перепадов уровней моря и литодинамическую модель.

Выводы. Рассмотрев метод оценки местного размыва, представленный в ВСП 33-03-07, и учитывая инженерно-геологические условия вблизи морского терминала НЗМУ, а также принятые в проекте конструктивные решения, установили, что указанный метод не может быть применен для достоверной оценки характеристик местного размыва у свайных опор морского терминала. По итогам моделирования литодинамических процессов у свайных опор проектируемых причальных сооружений ожидаемый размыв в результате действия экстремальных штормов не превышал 25 см, не образуя полную воронку размыва вокруг сваи. С наветренной стороны свай формировались зоны аккумуляции наносов, большие по объему, чем зоны размыва. Это, в свою очередь, дает возможность предполагать незначительность влияния литодинамических процессов на устойчивость свайных опор во время эксплуатации ГТС морского терминала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: местный размыв, перенос наносов, численное моделирование, морской причал, свайное основание, SWAN, COASTOX

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кантаржи И.Г., Гогин А.Г., Куприн А.В. Аналитические и численные исследования размывов свайного основания морского причала // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 5. С. 603–613. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.603-613

Автор, ответственный за переписку: Измаил Григорьевич Кантаржи, kantardgi@yandex.ru.

Analytical and numerical studies on the scouring of a pile foundation of a marine terminal

Izmail G. Kantarzhi, Alexander G. Gogin, Alexander V. Kuprin

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

ABSTRACT

Introduction. The purpose of the work is to assess potential scouring of the bottom soil of a designed marine terminal resting on a pile foundation to prevent the bottom erosion caused by wind waves and currents.

Materials and methods. The authors have analyzed those effective regulatory documents that could be potentially used to study erosion near pile foundations of marine terminal structures. Numerical modelling of lithodynamic processes was conducted in the mooring basin area in extreme weather conditions, like severe storms, to study soil erosion near the hydraulic structures of the marine terminal.

Results. Having analyzed the method used to assess local erosion pursuant to VSP 33-03-07 (Industry-wide set of rules 33-03-07), the authors concluded that it had major fundamental drawbacks and, therefore, it could not be applied

to a multi-row pile structure. Therefore, it could not guarantee the required accuracy of projections. The authors presented the numerical modelling of wind waves, currents and lithodynamic processes to study the wave erosion on the bottom of the mooring basin of the marine terminal. Towards this end, a three-level system of interconnected models was designed. It had a model of wind waves, a model of currents and changes in sea levels and a lithodynamic model.

Conclusions. Having considered a method for assessing local erosion, described in VSP 33-03-07 (Industry-wide set of rules 33-03-07), engineering and geological conditions near the NZMU marine terminal, as well as the structural solutions contributed to the project, the authors believe that this method cannot be applied to reliably analyze local erosion near the pile supports of a sea terminal. Simulated lithodynamic processes, that are underway near the pile supports of designed mooring structures, suggest that anticipated erosion, caused by severe storms, did not exceed 25 cm and no complete erosion funnel was formed around the pile. Sediment accumulation zones appeared on the windward side of the piles. They were larger than the zones of erosion. Therefore, the authors assume that the influence of lithodynamic processes on the stability of pile supports is insignificant during the operation of hydraulic structures of the marine terminal.

KEYWORDS: local scour, sediment transport, numerical modeling, marine terminal, pile foundation, SWAN, COASTOX

FOR CITATION: Kantarzhi I.G., Gogin A.G., Kuprin A.V. Analytical and numerical studies on the scouring of a pile foundation of a marine terminal. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):603-613. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.603-613. (rus.).

Corresponding author: Izmail G. Kantarzhi, kantardgi@yandex.ru

ВВЕДЕНИЕ

Цель исследования — оценка возможных размывов донного грунта проектируемого причала на свайном основании для обеспечения проектных решений по защите дна от размыва в результате действия ветровых волн и течений.

Территория Находкинского завода минеральных удобрений (НЗМУ) расположена в промышленной зоне п. Врангель Находкинского городского округа на берегу бухты Врангеля залива Находка. Морской терминал планируется построить в районе мыса Петровского на северо-востоке от существующего порта Восточный.

Генеральный план морского терминала НЗМУ представлен на рис. 1. В состав гидротехнических сооружений (ГТС) терминала входит один причал — грузовой причал № 1. Причал соединен с берегом подходной эстакадой. Палы также проектируются на свайном основании.

В ходе исследования были выполнены следующие работы:

- анализ применимости существующих инженерных методов расчета для оценки местного размыва дна у оснований сквозных свайных сооружений морского терминала;
- численное моделирование размыва грунта дна у опор сквозных свайных сооружений морского

терминала НЗМУ для установленного ранее в этих исследованиях волнового режима.

С целью анализа применимости существующих инженерных методов проанализированы нормативные документы РФ, которые потенциально могли бы быть использованы для расчета размыва у опор свайного основания причальных сооружений: РД 31.31.55-93¹, СП 287.1325800.2016², ВСП 33-03-07³.

Из всех имеющихся моделей для реализации численного моделирования волновых режимов наибольшее распространение получили модели SWAN⁴ [1], WaveWatch III⁵ и MIKE 21^{6,7}. Для данной работы использовалась модель SWAN. Она широко применяется в России и за рубежом как инструмент расчета волновых полей прибрежной зоны [2–9]. Кроме этого, известны теоретические и экспериментальные научные труды, посвященные исследованиям некоторых частных случаев образования размывов при воздействии волн у цилиндрических опор, которые проводились как в России [10–12], так и за рубежом [13–18]. Тем не менее не найдено публикаций, в которых было бы проведено сравнение результатов, получаемых с помощью современных научно обоснованных инструментов, с нормативными методами, приведенными в действующих российских нормативах, что представляется актуальной задачей.

¹ РД 31.31.55-93. Инструкции по проектированию морских причальных и берегоукрепительных сооружений. М. : Федеральная служба морского флота России, 1996.

² СП 287.1325800.2016. Сооружения морские причальные. Правила проектирования и строительства. М. : Минстрой России, 2016.

³ ВСП 33-03-07. Инструкция по проектированию откосных и сквозных оградительных сооружений и специальных подводных стендов. М. : МО РФ, 2008.

⁴ Holthuijsen L., Booij N., Ris R., Haagsma I.G., Kiefteburg A., Kriebitz E.E. SWAN Cycle III version 40.51 User Manual. Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands. 2009.

⁵ Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III™ version 3.14. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276. 2009. 194 p.

⁶ MIKE Powered by DHI. URL: <https://www.mikepoweredbydhi.com/>

⁷ DHI Water and Environment. MIKE 21, Spectral Wave Module. 2007. URL: http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Coast_and_Sea/M21SW_Scientific_Doc.pdf

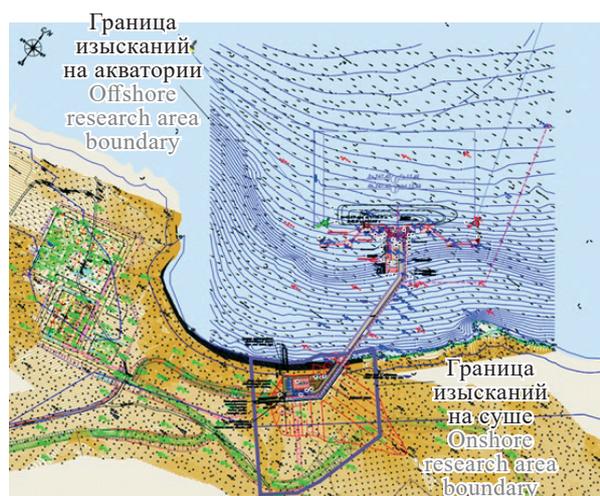


Рис. 1. Генеральный план морского терминала НЗМУ

Fig. 1. Master plan of NZMU marine terminal

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Общие сведения об объекте исследования

Продольные сечения ГТС терминала по конструктивным разрезам 1-1–2-2 показаны на рис. 2.

Акватория терминала не защищена молами, она естественным образом закрыта с юга сушей, с востока мысом Петровского и с юго-запада частично небольшим безымянным мысом. В силу этого терминал открыт для волн северо-восточного (СВ), северного (С), северо-западного (СЗ), западного (З) и частично юго-западного (ЮЗ) направлений.

Анализ существующих нормативных документов

Проанализированы нормативные документы РФ, которые потенциально могли бы быть использованы для расчета размыва у опор свайного основания причальных сооружений: РД 31.31.55-93, СП 287.1325800.2016, ВСП 33-03-07.

Нормативные документы предъявляют следующие основные требования к причальным сооружениям сквозного типа.

1. Для предотвращения размыва дна перед сооружением от действия волнения, течений и движителей судов следует предусматривать на полосе вдоль сооружения защиту основания.

2. С целью сокращения количества и длины свай в основаниях глубоководных конструкций эстакадного типа, а также повышения несущей способности и устойчивости свай рекомендуются устраивать защиту дна у сооружений от возможного размыва в случае значительных скоростей течения, особенно при наличии легкоразмываемых грунтов на поверхности основания.

3. В условиях придонных течений, размывающих дно, следует проектировать свайные сооружения. При этом необходимо либо выполнять расчет прогнозируемого значения размыва дна в це-

лях учета этого явления при проектировании, либо укреплять дно для предотвращения его размыва у причального сооружения.

В ВСП 33-03-07 содержится метод оценки местного размыва у опор сквозных сооружений, который будет рассмотрен и проанализирован в следующем разделе.

Общие сведения об используемых численных моделях

Для определения величины размыва грунта вблизи ГТС морского терминала выполнено численное моделирование литодинамических процессов на припричальной акватории в условиях действия экстремальных штормов.

Использовалась модель SWAN. Выбор данной модели основан на факторе, являющемся главным преимуществом SWAN, — нерегулярная сетка, которая обеспечивает более точное представление об исследуемой области. А применение 2D-модели считается достаточно точным для получения области построения. Модель SWAN все шире используется в России и за рубежом как инструмент расчета волновых полей прибрежной зоны [6–9].

Моделирование литодинамических береговых процессов осуществлялось с помощью программы открытого доступа COASTOX. COASTOX включает модуль постпроцессинга, также реализованный на нерегулярных сетках, для передачи результатов SWAN в другие модули системы, который может быть снабжен кодом SWAN, триггерированным для использования в COASTOX.

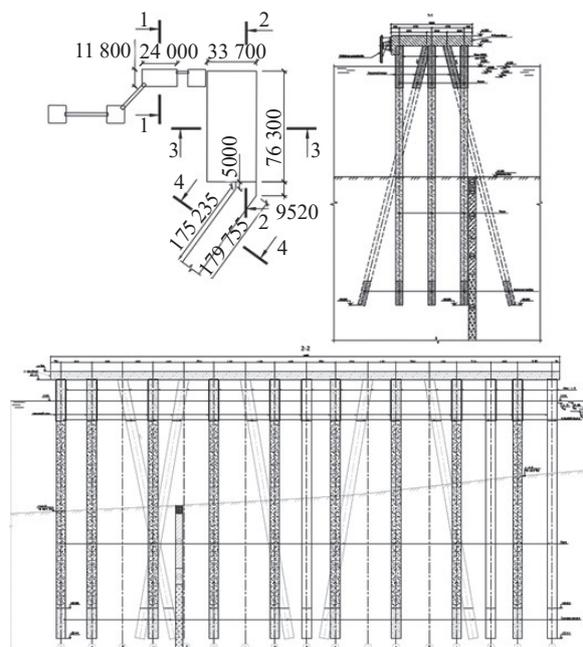


Рис. 2. Конструктивные разрезы морского терминала НЗМУ

Fig. 2. Structural sections of NZMU marine terminal

Численное моделирование было разделено на два этапа:

- моделирование размыва грунта дна при причальной акватории;
- моделирование местного размыва наносов у свайных опор сооружений.

На первом этапе определены наиболее опасные (с точки зрения местного размыва) волновые режимы, которые затем использовались и на втором этапе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчетный метод оценки размыва ВСП 33-03-07

Метод оценки содержится в ВСП 33-03-07 в разделе 6.2.5. Глубина Δd , м, и диаметр D_p , м, воронки размыва в песчаном или гравелистом грунте вокруг опор свайного типа диаметром (шириной) $D_0 = 1-5$ м рассчитываются по формулам:

$$\Delta d = K_p D_0, \quad (1)$$

$$D_p = 2 \Delta d \operatorname{ctg} \varphi + D_0, \quad (2)$$

где K_p — коэффициент размыва, принимаемый по графику на рис. 6.6 ВСП 33-03-07 в зависимости от параметра

$$P_p = \sqrt{\frac{K_v^2 (v_c^2 + v_b^2) - v_{b,adm}^2}{g D_0}}, \quad (3)$$

где K_v — коэффициент увеличения скорости у опоры. Принимается равным: $K_v = 1,5$ — для круглого сечения опоры, $K_v = 2,5$ — для квадратного сечения опоры; v_c — средняя скорость течения, м/с; v_b — волновая скорость у дна, осредненная за половину периода волны, определяемая по формуле:

$$v_b = \frac{2h_a}{\sqrt{\frac{\pi \bar{\lambda} s h}{g} \frac{4\pi d}{\lambda}}}, \quad (4)$$

где h_a — высота волны, м, принимаемая равной высоте исходной волны $h_{1\%}$ для переднего ряда опор и высоте дифрагированной волны h_{dif} , устанавливаемой по формуле 5.27 ВСП 33-03-07 для остальных опор; $v_{b,adm}$ — допускаемая неразмывающая донная скорость, принимаемая по рис. В.1 СП 38.13330.2018⁸; φ — угол внутреннего трения грунта, град.

Анализ метода расчета местного размыва ВСП 33-03-07 с точки зрения современных исследований позволяет высказать следующие критические соображения.

1. В качестве высоты волн, определяющей размыв, предлагается принимать для первого ряда свай «исходную» высоту волн 1 % обеспеченности. Исходная высота волн берется на подходе к сооружению, тогда как размыв устанавливается волной непосредственно в зоне размыва. То есть метод не учитывает

историю распространения волн от створа подхода к сооружению до, собственно, участка размыва.

2. Уменьшение высоты волн дифракцией на сваях учитывается только для второго ряда свай и не учитывается для последующих. При этом известно, что для свай с диаметром менее $0,2\lambda$, где λ — длина волн, обтекание свай волной происходит без дифракции. Таким образом, метод не применим для условий второго и последующих рядов свай.

3. Начало движения донных наносов под действием поверхностных волн определяется не осредненной за половину периода скоростью у дна, как в формуле (4), а так называемой эффективной придонной волновой скоростью [19], v_b :

$$v_b^2 = \frac{f_w U_b^2}{2 \cdot 2}, \quad (5)$$

где f_w — коэффициент волнового трения; U_b — придонная волновая скорость. То есть условия начала трогания донных наносов устанавливаются не только волнами, но и состоянием придонной области дна.

Таким образом, метод оценки местного размыва ВСП 33-03-07 обладает принципиальными недостатками для условий многорядной свайной конструкции и не может гарантировать необходимую точность прогноза.

Численное моделирование размыва/аккумуляции наносов

Далее представлены результаты численного моделирования для штормов западного направления, как наиболее волноопасного.

Моделирование размыва на припричальной акватории

Для численного моделирования литодинамических процессов на акватории вблизи ГТС морского терминала была построена локальная модель прилегающей акватории. Батиметрия акватории для расчетной сетки конечных элементов (КЭ) принята по генеральному плану морского терминала, выполненному по батиметрической съемке и представленному на рис. 1.

Расчеты полей ветровых волн, течений и литодинамических процессов проводились на единой треугольной сетке КЭ, что позволяет избежать ошибок при передаче данных между моделями, связанных с аппроксимацией на различных сетках КЭ.

Для расчета волнового режима на локальной модели осуществлено моделирование влияния ветровых волн при действии экстремальных штормов различных румбов повторяемостью 1 раз в 25 лет. С этой целью модель запускалась в режиме нерегулярных волн с заданным частотно-направленным спектральным распределением [20], определяемым высотой значительных волн h_s и пиковым периодом T_p .

⁸ СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).

Параметры расчетного волнового режима на акватории приняты по полученным на предыдущем этапе результатам⁹. Волновое воздействие при расчетных штормах задается на открытых границах локальной модели, а его характеристики даны в табл. 1.

Волнение, задаваемое на открытых границах модели, распространяется на открытой акватории при действии ветра расчетных скоростей и обрушается на небольших глубинах. Расчетные скорости ветра приведены в табл. 2.

Расчетная продолжительность шторма принята равной 6 часов. Результаты моделирования снимаются на момент окончания действия экстремального ветра.

Расчетный уровень 50 % обеспеченности по наивысшим годовым уровням принят равным –0,44 м БС.

Расчетные характеристики слагающих дно наносов приняты следующими¹¹: средний диаметр частиц $d_{50} = 0,50$ мм; пористость $n = 0,40$; коэффициент градиции $k = 1,10$.

Полученное поле значительных волн на акватории морского терминала во время действия шторма

Табл. 1. Параметры волнового режима, используемые для инициализации локальной волновой модели и задаваемые на открытых границах

Table 1. Wave mode parameters used to initialize a local wave model and preset in areas of open boundaries

1 раз в N лет Once every N years	ЮЗ / SW		З / W		СЗ / NW		С / N		СВ / NE	
	T_p, c s	h_s, m m								
25	11,88	2,40	13,85	3,02	5,92	1,56	7,61	0,95	7,38	1,03

Табл. 2. Расчетные значения скоростей ветра с осреднением 10 мин, задаваемые над расчетной акваторией, м/с¹⁰

Table 2. Calculated values of wind velocities set as 10-minute average above the analyzed water area, m/s¹⁰

1 раз в N лет Once every N years	ЮЗ / SW	З / W	СЗ / NW	С / N	СВ / NE
25	26	28	28	30	29

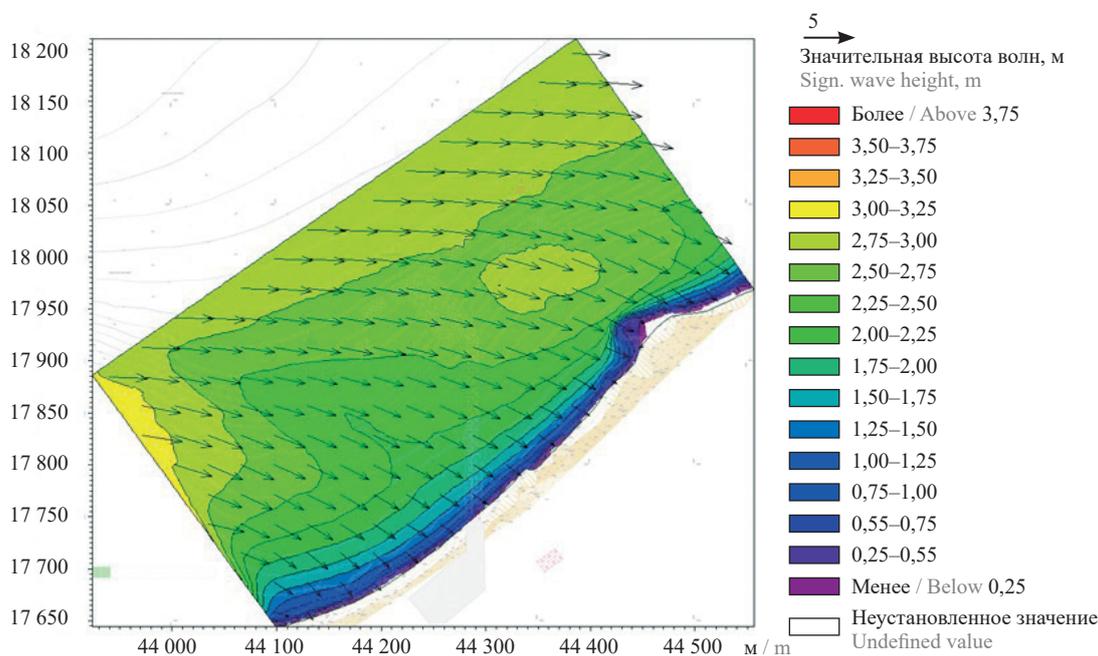


Рис. 3. Значительные высоты волн при действии шторма 3 румба повторяемостью 1 раз в 25 лет

Fig. 3. Significant wave heights in case of a W storm with a recurrence rate of once every 25 years

⁹ Отчет о НИР по теме «Математическое и физическое моделирование волновых процессов, для обеспечения разработки проектной документации по объекту «Находкинский завод минеральных удобрений. Морской терминал». Этап № 1. НИУ МГСУ, 2021.

¹⁰ 1300-4810-11-ИГД.СУБ-3.1. Технический отчет по инженерно-гидрометеорологическим изысканиям по объекту «Находкинский завод минеральных удобрений. Морской терминал». Книга 3.1. Том 1.3.3.1. АО «Ленморниипроект», 2020.

¹¹ Находкинский завод минеральных удобрений. Морской терминал. Технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий. Книга 2.2. Приложения. Том 2.2.2, 2021.

западного направления повторяемостью 1 раз в 25 лет представлено на рис. 3. Соответствующее поле течений — на рис. 4. Вертикальные приращения отметок дна после шторма показаны на рис. 5.

Принцип построения численной модели для моделирования местного размыва/аккумуляции наносов у свайных опор сооружений, а также исходные данные по входящим волнам и действующему ветру аналогичны описанным в предыдущем разделе. Отличные от них настройки модели следующие.

Моделирование местного размыва от волн у свайных опор сооружений

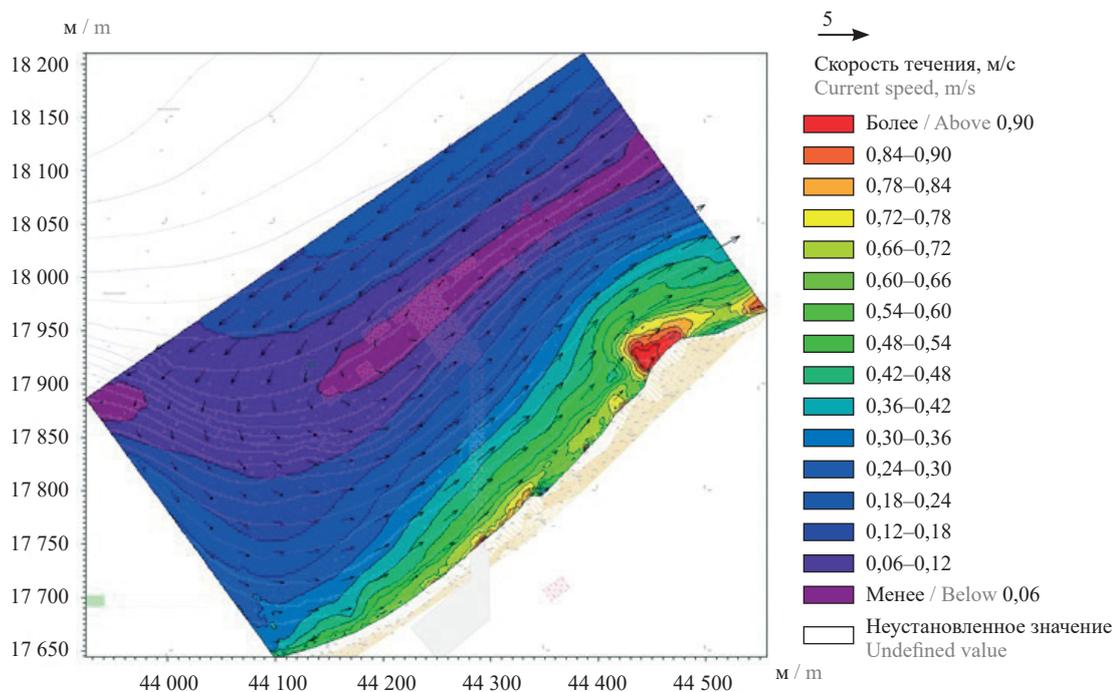


Рис. 4. Скорости течений при действии шторма 3 румба повторяемостью 1 раз в 25 лет
 Fig. 4. Speed values of currents in case of a W storm with a recurrence rate of once every 25 years

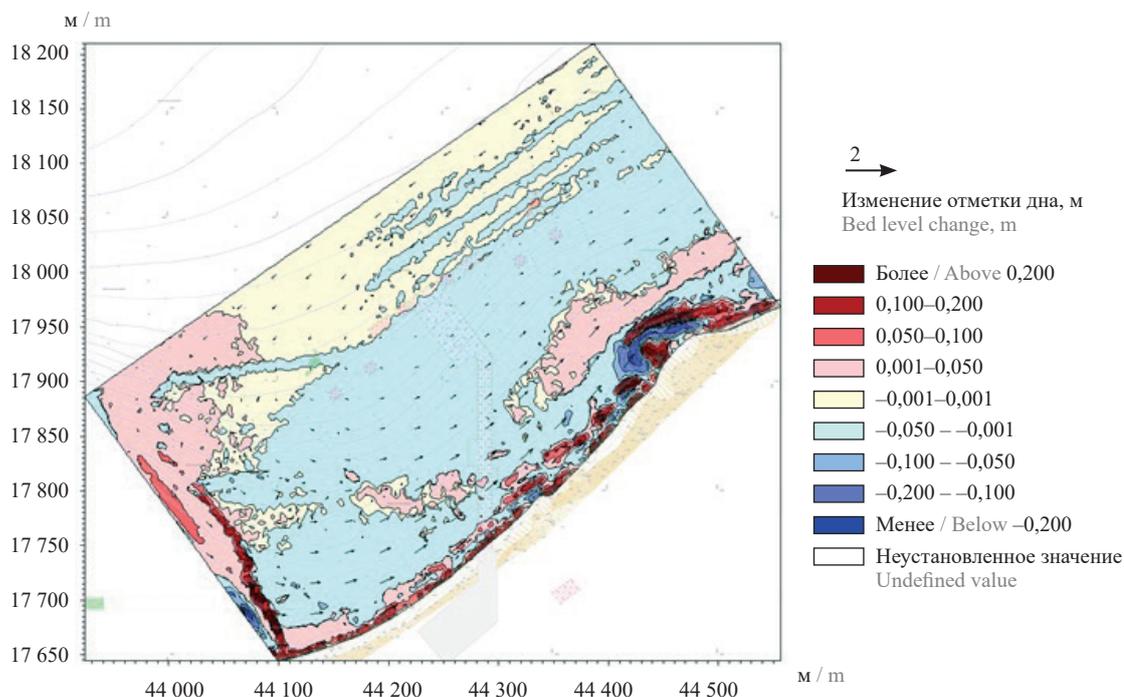


Рис. 5. Вертикальные приращения отметок дна после шторма 3 румба повторяемостью 1 раз в 25 лет
 Fig. 5. Vertical increments of bed level change after a W storm with a recurrence rate of once every 25 years

В расчетную сетку введены свайные опоры в явном виде. Площадь КЭ уменьшена локально у свайных опор до 1,5 м². Общее количество элементов в расчетной сетке КЭ составило 39 981 узлов — 21 115. Исследуемая область также ограничена тремя открытыми границами (условно

западной, северной и восточной), а также закрытой границей (условно южной) по линии уреза воды.

Полученное поле значительных волн в расчетной области во время действия шторма западного направления повторяемостью 1 раз в 25 лет

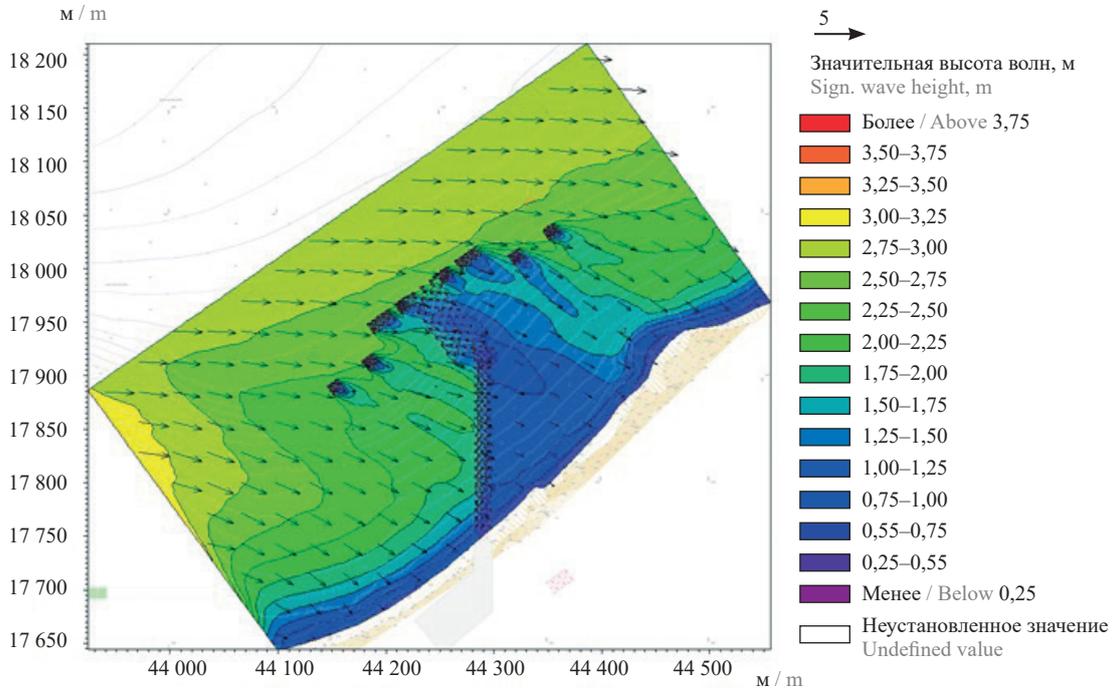


Рис. 6. Значительные высоты волн при действии шторма 3 румба повторяемостью 1 раз в 25 лет

Fig. 6. Significant wave heights in case of a W storm with a recurrence rate of once every 25 years

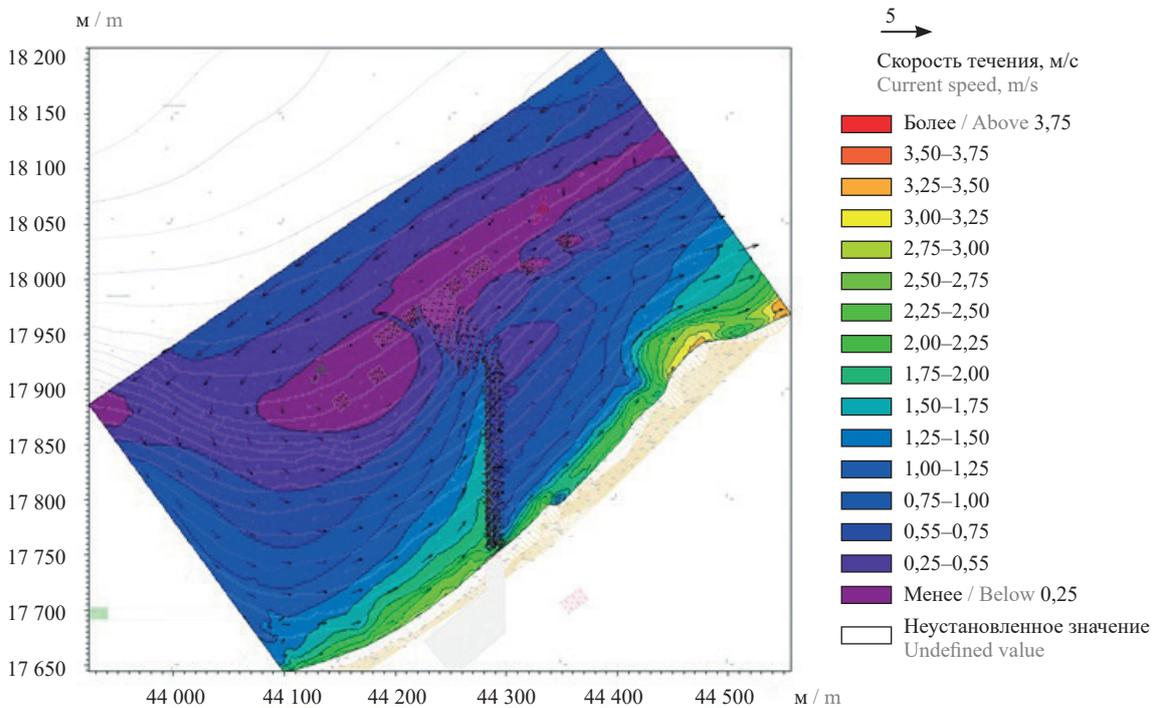


Рис. 7. Скорости течений при действии шторма 3 румба повторяемостью 1 раз в 25 лет

Fig. 7. Speed values of currents in case of a W storm with a recurrence rate of once every 25 years

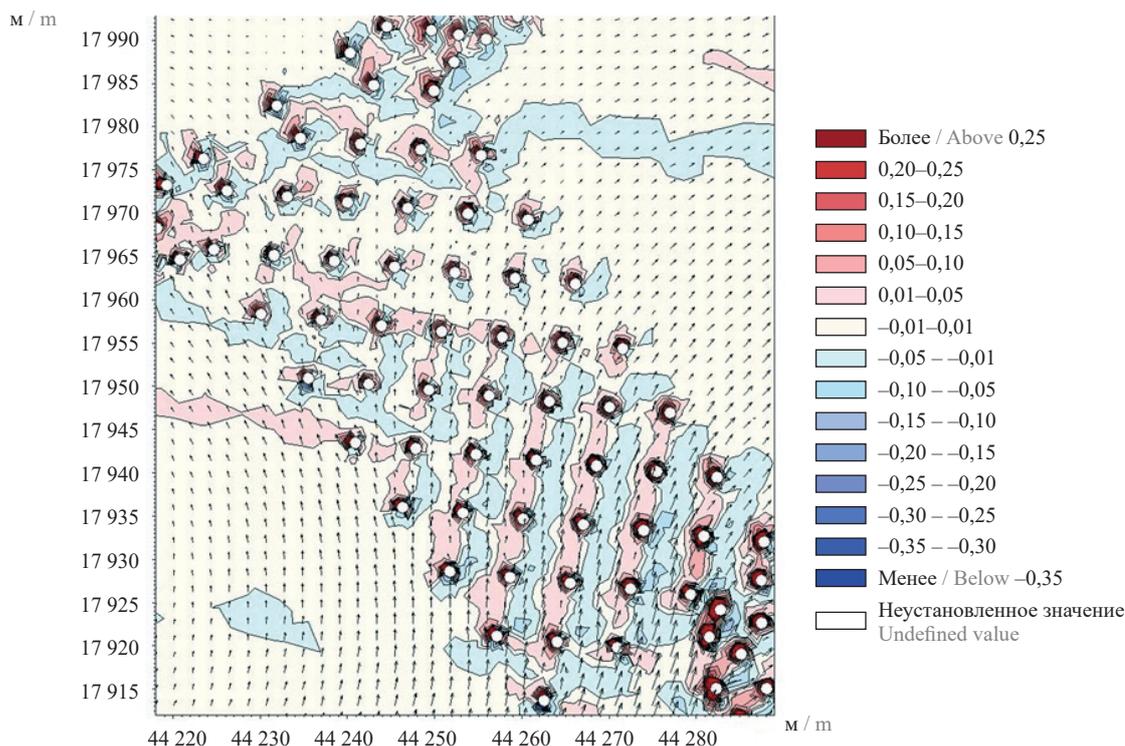


Рис. 8. Вертикальные приращения отметок дна после шторма 3 румба повторяемостью 1 раз в 25 лет у свайного основания рабочей площадки

Fig. 8. Vertical increments of bed level change after a W storm with a recurrence rate of once every 25 years near the pile foundation of the working platform

представлено на рис. 6. Соответствующее поле течений — на рис. 7. Вертикальные приращения отметок дна после шторма показаны на рис. 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа требований нормативных документов к сквозным свайным сооружениям сделан вывод о том, что для свайных сооружений сквозного типа необходимо либо выполнять расчет прогнозируемого значения размыва дна в целях учета явления местного размыва при проектировании, либо укреплять дно для предотвращения его размыва у причального сооружения.

Рассмотрев метод оценки местного размыва, представленный в ВСП 33-03-07, и учитывая инженерно-геологические условия вблизи морского терминала НЗМУ, а также принятые в проекте конструктивные решения, данный метод не может быть применен для достоверной оценки характеристик местного размыва у свайных опор морского терминала.

Численное моделирование ветровых волн, течений и литодинамических процессов для ис-

следования величин волнового размыва грунта дна причальных акваторий и местного размыва грунта дна у опор свайных сооружений реализовано с помощью трехуровневой системы взаимосвязанных моделей, включающей модель ветровых волн, модель течений и перепадов уровней моря и литодинамическую модель.

По результатам моделирования литодинамических процессов у свайных опор проектируемых причальных сооружений ожидаемый размыв в результате действия экстремальных штормов не превышал 25 см, не образуя полную воронку размыва вокруг сваи. У сваи подходной эстакады на небольших глубинах максимальные размывы у сваи достигали 35 см, также не образуя полную воронку размыва. С наветренной стороны сваи формировались зоны аккумуляции наносов, большие по объему, чем зоны размыва. Это, в свою очередь, дает возможность предполагать незначительность влияния литодинамических процессов на устойчивость свайных опор во время эксплуатации гидротехнических сооружений морского терминала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Holthuijsen L.H.* Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press, 2007. DOI: 10.1017/CBO9780511618536

2. *Akpınar A., van Vledder G.Ph., Kömürçü M.İ., Özger M.* Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea // Con-

tinental Shelf Research. 2012. Vol. 50–51. Pp. 80–99. DOI: 10.1016/j.csr.2012.09.012

3. Kutupoğlu V., Çakmak R.E., Akpınar A., van Vledder G.P. Setup and evaluation of a SWAN wind wave model for the Sea of Marmara // Ocean Engineering. 2018. Vol. 165. Pp. 450–464. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.053

4. Beyramzade M., Siadatmousavi S.M. Implementation of viscoelastic mud-induced energy attenuation in the third-generation wave model, SWAN // Ocean Dynamics. 2018. Vol. 68. Issue 1. Pp. 47–63. DOI: 10.1007/s10236-017-1118-4

5. Wu Z., Jiang C., Deng B., Chen J., Cao Y., Li L. Evaluation of numerical wave model for typhoon wave simulation in South China Sea // Water Science and Engineering. 2018. Vol. 11. Issue 3. Pp. 229–235. DOI: 10.1016/j.wse.2018.09.001

6. Rogers W.E., Kaihatu J.M., Hsu L., Jensen R.E., Dykes J.D., Holland K.T. Forecasting and hindcasting waves with the SWAN model in the Southern California Bight // Coastal Engineering. 2007. Vol. 54. Issue 1. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2006.06.011

7. Lemkea N., Fontourab J.A.S., Callaria D.F., Fonseca D. Comparative study between modeled (SWAN) and measured (waverider buoy) wave data in Patos Lago–RS, Brazil // Pan-American Journal of Aquatic Sciences. 2017. Vol. 12. Issue 1. Pp. 1–13.

8. Dietrich J.C., Zijlema M., Westerink J.J., Holthuijsen L.H., Dawson C., Luettich R.A. et al. Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations // Coastal Engineering. 2011. Vol. 58. Issue 1. Pp. 45–65. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2010.08.001

9. Dietrich J.C., Tanaka S., Westerink J.J., Dawson C.N., Luettich R.A., Zijlema M. et al. Performance of the unstructured-mesh, SWAN+ADCIRC model in computing hurricane waves and surge // Journal of Scientific Computing. 2012. Vol. 52. Issue 2. Pp. 468–497. DOI: 10.1007/s10915-011-9555-6

10. Алибеков А.К. Оценка размыва у свайных опор сооружений, пересекающих водотоки, с учетом показателей надежности и неоднородности грунтов основания // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. Т. 45. № 1. С. 181–192. DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-1-181-192

11. Этин П.Ю., Левтринский В.В. Проектирование среднего железобетонного железнодорожного моста на свайном основании: учебно-методическое пособие. Гомель : БелГУТ, 2009. 67 с.

12. Алибеков А.К., Идрисова С.Г. Местный размыв русла у мостовых опор различных конструкций // Актуальные проблемы и перспективы развития дорожно-транспортного комплекса : сб. науч. тр. 3-й Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 91.

13. Sumer B.M., Whitehouse R.J.S., Tørum A. Scour around coastal structures: a summary of recent research // Coastal Engineering. 2001. Vol. 44. № 2. Pp. 153–190. DOI: 10.1016/S0378-3839(01)00024-2

14. Tonkin S., Yeh H., Kato F., Sato S. Tsunami scour around a cylinder // Journal of Fluid Mechanics. 2003. Vol. 496. Pp. 165–192. DOI: 10.1017/S0022112003006402

15. Voropayev S.I., Testik F.Y., Fernando H.J.S., Boyer D.L. Burial and scour around short cylinder under progressive shoaling waves // Ocean Engineering. 2003. Vol. 30. Issue 13. Pp. 1647–1667. DOI: 10.1016/S0029-8018(02)00146-4

16. Martinelli L., Zanuttigh B., Lamberti A. Hydrodynamic and morphodynamic response of isolated and multiple low crested structures: Experiments and simulations // Coastal Engineering. 2006. Vol. 53. Issue 4. Pp. 363–379. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2005.10.018

17. Young D.M., Testik F.Y. Onshore scour characteristics around submerged vertical and semi-circular breakwaters // Coastal Engineering. 2009. Vol. 56. Issue 8. Pp. 868–875. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2009.04.003

18. Hur D.S., Kim C.H., Yoon J.S. Numerical study on the interaction among a nonlinear wave, composite breakwater and sandy seabed // Coastal Engineering. 2010. Vol. 57. Issue 10. Pp. 917–930. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2010.05.010

19. Кантаржи И.Г., Анцыферов С.М. Моделирование взвешенных наносов под волнами на течиции // Океанология. 2005. Т. 45. № 2. С. 173–181.

20. Давидан И.Н., Давидан Г.И., Дымов В.И., Пасечник Т.А. Модифицированная версия спектрально-параметрической модели ветрового волнения и результаты ее верификации // Известия Русского географического общества. 2010. Т. 142. № 2. С. 31.

Поступила в редакцию 22 декабря 2021 г.

Принята в доработанном виде 03 мая 2022 г.

Одобрена для публикации 03 мая 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: **Измаил Григорьевич Кантаржи** — 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: 60202, 1086368, Scopus: 6602848417, 57200265787, ResearcherID: A-1922-2014, ORCID: 0000-0002-0587-4722; kantardgi@yandex.ru;

Александр Григорьевич Гогин — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет**

(НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 994101, Scopus: 57192663878, ORCID: 0000-0003-3894-3680; ag.gogin@yandex.ru;

Александр Васильевич Куприн — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1101401; rtyter55@gmail.com.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Holthuijsen L.H. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press, 2007. DOI: 10.1017/CBO9780511618536
2. Akpınar A., van Vledder G.Ph., Kömürçü M.İ., Özger M. Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea. *Continental Shelf Research*. 2012; 50-51:80-99. DOI: 10.1016/j.csr.2012.09.012
3. Kutupoğlu V., Çakmak R.E., Akpınar A., van Vledder G.Ph. Setup and evaluation of a SWAN wind wave model for the Sea of Marmara. *Ocean Engineering*. 2018; 165:450-464. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.053
4. Beyramzade M., Siadatmousavi S.M. Implementation of viscoelastic mud-induced energy attenuation in the third-generation wave model, SWAN. *Ocean Dynamics*. 2018; 68(1):47-63. DOI: 10.1007/s10236-017-1118-4
5. Wu Z., Jiang C., Deng B., Chen J., Cao Y., Li L. Evaluation of numerical wave model for typhoon wave simulation in South China Sea. *Water Science and Engineering*. 2018; 11(3):229-235. DOI: 10.1016/j.wse.2018.09.001
6. Rogers W.E., Kaihatu J.M., Hsu L., Jensen R.E., Dykes J.D., Holland K.T. Forecasting and hindcasting waves with the SWAN model in the Southern California Bight. *Coastal Engineering*. 2007; 54(1):1-15. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2006.06.011
7. Lemkea N., Fontourab J.A.S., Callaria D.F., Fonseca D. Comparative study between modeled (SWAN) and measured (waverider buoy) wave data in Patos Lago—RS, Brazil. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*. 2017; 12(1):1-13.
8. Dietrich J.C., Zijlema M., Westerink J.J., Holthuijsen L.H., Dawson C., Luettich R.A. et al. Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations. *Coastal Engineering*. 2011; 58(1):45-65. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2010.08.001
9. Dietrich J.C., Tanaka S., Westerink J.J., Dawson C.N., Luettich R.A., Zijlema M. et al. Performance of the unstructured-mesh, SWAN+ADCIRC model in computing hurricane waves and surge. *Journal of Scientific Computing*. 2012; 52(2):468-497. DOI: 10.1007/s10915-011-9555-6
10. Alibekov A.K. Evaluation of scouring at pile-supported structures crossing watercourses according to reliability and inhomogeneity indicators of grounding foundations. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2018; 45(1):181-192. DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-1-181-192 (rus.).
11. Etin P.Y., Levtrinskij V.V. *Design of a medium reinforced concrete railway bridge on a pile foundation: a teaching aid*. Gomel, BelSUT, 2009; 67. (rus.).
12. Alibekov A.K., Idrisova S.G. Local washout of the course at bridge support various designs. *Actual problems and prospects for the development of the road transport complex : collection of scientific papers of the 3rd international scientific and practical conference*. 2017; 91. (rus.).
13. Sumer B.M., Whitehouse R.J.S., Tørum A. Scour around coastal structures: a summary of recent research. *Coastal Engineering*. 2001; 44(2):153-190. DOI: 10.1016/S0378-3839(01)00024-2
14. Tonkin S., Yeh H., Kato F., Sato S. Tsunami scour around a cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*. 2003; 496:165-192. DOI: 10.1017/S0022112003006402
15. Voropayev S.I., Testik F.Y., Fernando H.J.S., Boyer D.L. Burial and scour around short cylinder under progressive shoaling waves. *Ocean Engineering*. 2003; 30(13):1647-1667. DOI: 10.1016/S0029-8018(02)00146-4
16. Martinelli L., Zanuttigh B., Lamberti A. Hydrodynamic and morphodynamic response of isolated and multiple low crested structures: Experiments and simulations. *Coastal Engineering*. 2006; 53(4):363-379. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2005.10.018
17. Young D.M., Testik F.Y. Onshore scour characteristics around submerged vertical and semicircular breakwaters. *Coastal Engineering*. 2009; 56(8):868-875. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2009.04.003
18. Hur D.S., Kim C.H., Yoon J.S. Numerical study on the interaction among a nonlinear wave, composite breakwater and sandy seabed. *Coastal Engineering*. 2010; 57(10):917-930. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2010.05.010
19. Kantardgi I.G., Antsyferov S.M. Modeling suspended sediments under waves on currents. *Oceanology*. 2005; 45(2):173-181. (rus.).
20. Davidan I.N., Davidan G.I., Dymov V.I., Pasechnik T.A. Modified version of spectral-parametric model of wind-induced waves and results of its verification. *Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2010; 142(2):31. (rus.).

Received December 22, 2021.

Adopted in revised form on May 03, 2022.

Approved for publication on May 03, 2022.

BIONOTES: **Izmail G. Kantarzhi** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 60202, 1086368, Scopus: 6602848417, 57200265787, ResearcherID: A-1922-2014, ORCID: 0000-0002-0587-4722; kantardgi@yandex.ru;

Alexander G. Gogin — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 994101, Scopus: 57192663878, ORCID: 0000-0003-3894-3680; ag.gogin@yandex.ru;

Alexander V. Kuprin — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1101401; rtyter55@gmail.com.

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

The authors declare that they have no conflicts of interest.

Моделирование переноса наносов в Каспийском море на составных сетках для одновременного учета глобального и локального масштабов

Борис Витальевич Архипов¹, Дмитрий Алексеевич Шапочкин¹,
Александр Львович Лобов², Владимир Иванович Батов²,
Ольга Васильевна Тихонова²

¹ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН); г. Москва, Россия;

² Гидрометцентр России; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Приводятся сведения, относящиеся к гидродинамическим и литодинамическим характеристикам процессов Каспийского моря. Представлено описание применяемых гидродинамических моделей. Впервые проведено численное моделирование циркуляции, волновых и литодинамических условий в акватории Северного Каспия (СК), соединенной с остальной частью Каспийского моря с использованием подхода с составными расчетными сетками. Даны результаты моделирования переноса наносов. Обсуждаются итоги численных расчетов заносимости области второго колена Волго-Каспийского морского судоходного канала (ВКМСК).

Материалы и методы. Выполнено численное моделирование прибрежных волновых и гидродинамических процессов на основе морфодинамической компьютерной модели Delft3D. Волновой модуль Delft3D включает модель SWAN (Simulating Waves Nearshore) для вычисления распространения и генерации волн. Гидродинамическое течение моделируется с помощью модуля FLOW, который решает нестационарные уравнения гидродинамики с включением блока переноса наносов.

Результаты. Построены расчетные сетки, состоящие из сетки с большим шагом, равным 5000 м, покрывающей среднюю и южную части Каспийского моря, и сетки для СК с шагом 1000 м. Приведены высота и направление значительных волн для СК, осредненные за 210 сут потоки наносов в СК, график кумулятивного накопления наносов в районе второго колена ВКМСК.

Выводы. Показано, что усредненный годовой вдольбереговой поток наносов в области морского края дельты Волги имеет юго-западное направление, представлена оценка его величины. Продемонстрирована оценка заносимости ВКМСК и сравнение с данными, полученными по ремонтным дноуглубительным работам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: литодинамические и седиментационные процессы, гранулометрический анализ, влекомые и взвешенные наносы, заносимость, аккумуляция, эрозия, метеорологические характеристики, ветровые волны, морские течения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Архипов Б.В., Шапочкин Д.А., Лобов А.Л., Батов В.И., Тихонова О.В. Моделирование переноса наносов в Каспийском море на составных сетках для одновременного учета глобального и локального масштабов // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 5. С. 614–627. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.614-627

Автор, ответственный за переписку: Борис Витальевич Архипов, arh12.bor12@yandex.ru.

Using nested grids to simulate sediment transport in the Caspian Sea with account taken of global and local scales

Boris V. Arkhipov¹, Dmitry A. Shapochkin¹, Alexander L. Lobov²,
Vladimir I. Batov², Olga V. Tikhonova²

¹ Federal Research Center “Informatics and Management” of the Russian Academy of Sciences; Moscow, Russian Federation;

² Hydrometeorological Center of Russia; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper provides information on hydrodynamic and lithodynamic characteristics of processes in the Caspian Sea. A description of applied hydrodynamic models is presented. The numerical simulation of circulation, wave and lithodynamic conditions in the waters of the Northern Caspian Sea, middle and southern parts of the Caspian Sea was first conducted using composite computational grids. Simulated sediment transport results are presented. Results of numerical calculations of sediment accumulations in the second sweep of the Volga-Caspian canal are discussed.

Materials and methods. Numerical modeling of coastal wave and hydrodynamic processes is performed using the Delft3d morphodynamic computer model. The Delft3D wave module includes a SWAN (Simulating Waves Nearshore) model for calculating the propagation and generation of waves. The hydrodynamic flow is simulated using the FLOW module, that solves non-stationary hydrodynamic equations and has a sediment transfer unit.

Results. Computational grids are generated; they have a large step equal to 5,000 m. One grid is built for the middle and southern parts of the Caspian Sea and the other is made for the Northern Caspian; the grid step is equal to 1,000 m. The height and direction of significant waves in the Northern Caspian are provided. Sediment flows, averaged over 210 days in the SC, are provided. The authors also provide graphs of cumulative accumulation/erosion in the second sweep of the Volga-Caspian canal.

Conclusions. The authors show that the average yearly shore-parallel sediment flow in the area of the marine edge of the Volga river delta has a southwesterly direction, and an estimate of its magnitude is provided. An assessment of sediment accumulation in the Volga-Caspian canal is made, and its results are compared with the data obtained in the course of dredging works.

KEYWORDS: lithodynamic and sedimentation processes, granulometric analysis, transported and suspended sediments, sediment accumulation, erosion, meteorological characteristics, wind waves, sea currents

FOR CITATION: Arkhipov B.V., Shapochkin D.A., Lobov A.L., Batov V.I., Tikhonova O.V. Using nested grids to simulate sediment transport in the Caspian Sea with account taken of global and local scales *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):614-627. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.614-627 (rus.).

Corresponding author: Boris V. Arkhipov, arh12.bor12@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В Северном Каспии (СК) проходят несколько судоходных и рыбоходных каналов (Волго-Каспийский морской судоходный канал (ВКМСК), рыбоходные каналы Никитинский, Кировский, Белинский, Карайский и др.). Дополнительно в районе из-за экономической активности проектируются новые каналы и траншеи для обеспечения подходных путей, строительства трубопроводов и т.п. В связи с обмелением каналов и траншей возникает необходимость развития методов и моделей оценки их заносимости на основе численных моделей транспорта наносов¹ [1–6].

Настоящее исследование является продолжением работы [6]. В ней сделан существенный шаг вперед, поскольку проведено численное моделирование циркуляции, волновых и литодинамических процессов в акватории средней и южной частей Каспийского моря и в области СК с использованием подхода с составными расчетными сетками. Расчеты в предыдущем труде [6] проводились на одной сетке в районе ВКМСК, покрывающей небольшую часть СК. В таком подходе начинаются проблемы с заданием граничных условий (ГУ) на открытых границах локальной области. Моделирование в данном исследовании осуществляется с помощью подхода с составными расчетными сетками, когда не требуется задавать ГУ на открытых границах областей, поскольку расчеты на сетке СК и остальной части Каспийского моря идут одновременно с обменом информацией для установления ГУ.

Перенос наносов — один из наиболее обманчиво простых естественных процессов, который появляется в результате движения воды в виде течений и (или) волн. Поскольку морское дно и берега слагаются из осадочных пород, их изменения (в прибрежном рельефе или прибрежной геоморфологии) вызываются переносом наносов. Если

в какую-то область наносов поступает больше, чем уходит, то возникает аккумуляция песка, в противном случае — эрозия. Из этого упрощенного описания геоморфологических процессов для определения областей аккумуляция и (или) эрозии вытекает необходимость прогноза скорости и характера переноса наносов. В течение многих лет ученые пытались предсказать скорость переноса наносов в хорошо известных, контролируемых и стабильных условиях, хотя и это далеко не просто. Исследования методом проб и ошибок в этой области восходят к решению вопросов переноса наносов в ирригационных каналах древних цивилизаций. Существенное продвижение произошло в начале XX в. в работах А. Шилдса [7] по инициированию движения донных частиц. Эти публикации (А. Шилдса и др.) обобщены ван Рейном [8–11]. Для целей анализа наносы, переносимые потоком, делятся на влекомые (ВлН) и взвешенные (ВзН) [12, 13]. Хотя это разделение в некоторой степени искусственно, общепринято, что влекомые наносы состоят из частиц, которые скользят, катятся и (или) прыгают по дну, а взвешенные включают частицы, которые более или менее непрерывно взвешиваются турбулентным движением воды. Очевидно, что общая скорость переноса наносов представляет собой сумму переноса ВлН и ВзН. С 1984 г. полуэмпирические формулы ван Рейна получили широкое признание в качестве наиболее точных для переноса наносов.

Как отмечалось выше, исследователей интересует не столько фактическое количество наносов, переносимых потоком воды, сколько пространственные или временные изменения, которые могут произойти в количестве наносов, переносимых потоком. Например, если вода в канале, первоначально находящаяся в состоянии покоя, ускоряется, то количество наносов, переносимых водой,

¹ Шахин В.М. Разработка математической модели расчета деформаций дна и береговой зоны в прибрежной полосе Каспийского моря : заключительный отчет. Сочи : ЧО ЦНИИС, 1993.

со временем будет увеличиваться, вызывая эрозию русла. Эта ситуация возникает дважды в каждом приливном цикле в прибрежных водах. Точно так же устойчивый поток воды может быть локально ускорен вокруг волнолома в реке или на побережье, это ускорение тоже вызовет локальное увеличение переноса наносов и эрозию вблизи кончика волнолома в виде рытвин. Для того чтобы предсказать эти типы эрозии и аккумуляции следует представлять изменения в переносе отложений в пространстве и во времени. Простейшие расчеты переноса наносов включают анализ изменений переноса наносов в одном пространственном измерении. Такие модели оценивают скорость переноса наносов вдоль береговой линии и предсказывают эрозию или аккумуляцию на основе дивергенции потоков наносов. Следующий уровень сложности моделирования обеспечивается двумерными компьютерными моделями. По сути, они вычисляют величину и направление переноса наносов в большом количестве точек пространства и эрозию или осаждение, исходя из дивергенции потоков наносов. Двумерные модели имеют более широкую применимость, чем одномерные модели, поскольку они способны реалистично моделировать пространственные изменения в батиметрии.

Проблемы аккумуляции и (или) эрозии обычно возникают в тех местах, где способность гидро-системы транспортировать наносы снижается из-за уменьшения гидродинамических и волновых скоростей потока и связанных с ними турбулентных движений. Примерами являются: увеличение глубины и ширины потока за счет естественных колебаний или искусственных мер (дноуглубительные работы), наличие вихревых или турбулентных зон, зон разделения потока, зон мертвой воды и подветренных зон сооружений. Увеличение навигационной глубины уменьшает скорости, приводя к обмелению. Точно так же расширение ширины поворотных и швартовых бассейнов внутри портовой зоны снижает скорости, стимулирующие условия мелководья. Пирсы или свайные сооружения создают вихри, приводящие к повышению обмеления. Проблемы осадконакопления чаще всего связаны с вмешательствами человека в физическую систему, такими как строительство искус-

ственных сооружений или выемка грунтов из русла для увеличения глубины или ширины потока. Однако седиментация (как и эрозия) — основное природное явление, приводящее к переносу рыхлых пород и отложений в рамках цикла транспортировки от источника к месту выпадения осадков. Естественные области седиментации известны как отмели, банки, бары и т.п. Вмешательство человека в эти естественные зоны осадконакопления влечет относительно большие затраты на техническое обслуживание, поэтому к такому вмешательству следует относиться осторожно с учетом указанных процессов².

В работе впервые проведено численное моделирование ветровой циркуляции, волновых и литодинамических условий в акватории СК и остальной части Каспийского моря с применением подхода с составными расчетными сетками; выявлены особенности пространственного распределения осредненного потока наносов в СК; приведены оценка скорости заносимости в районе второго колена ВКМСК, сравнение с данными по заносимости ВКМСК, полученными из годовых объемов ремонтного дноуглубления для поддержания его навигационной глубины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Настоящее исследование посвящено разработке и верификации морфодинамической компьютерной модели, которая построена на основе системы гидродинамического моделирования Delft3D^{3, 4, 5}. Система Delft3D использует два основных модуля для моделирования прибрежных волновых гидродинамических процессов. Волновой модуль включает модель SWAN (Simulating Waves Nearshore) для вычисления распространения и генерации волн. Гидродинамическое течение моделируется с помощью модуля FLOW, который решает нестационарные уравнения гидродинамики с включением блока переноса наносов.

В Delft3D осадки схематически разделяются на два типа: несвязные — песок и связные — ил. Перенос несвязных осадков осуществляется в виде ВлН и ВзН, а перенос связных осадков рассматривается только как взвешенные наносы. Локальные скорости потока и турбулентная диффузия базируются на результатах гидродинамических рас-

² Исследование современного состояния гидролого-морфологических процессов по трассе Волго-Каспийского канала и обоснование габаритов реконструкции ВКК. I этап — Оценка современного состояния гидролого-морфологических процессов по трассе Волго-Каспийского канала : отчет о научно-исследовательской работе. М. : Московский государственный университет им. М.И. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши; ООО «Гей-Ваб», 2003.

³ Delft3D-FLOW. User Manual. Version: 3.15. Revision: 18392 (7 September 2011). Delft, Deltares, 2011; Delft3D-WAVE. User Manual. Version: 3.04. Revision: 15779 (18 May 2011). Delft, Deltares, 2011.

⁴ Ruessink G., Roelvink J.A. Validation of online Mud Transport within Delft3D-FLOW : Tech. rep. WLj Delft Hydraulics. Delft, the Netherlands. 2000.

⁵ Wilkens J. Bar Morphology Bornrif: modelling the evolution from 1982 to 1987 : Tech. rep., WLj Delft Hydraulics, Delft, the Netherlands. M.Sc.Thesis Univesity of Twente. 1999.

четов. В вычислительном отношении трехмерный перенос ВЗН вычисляется точно так же, как перенос любого другого консервативного компонента, такого как соленость и т.п. Однако существует ряд важных различий между ВЗН и другими загрязняющими веществами (ЗВ), например, обмен взвешенных веществ (ВВ) между дном и потоком в результате осаждения ВВ под действием силы тяжести и (или) взмучивание со дна в воду. Другие процессы, такие как влияние ВВ на локальную плотность смеси и, следовательно, на затухание турбулентности, также принимаются во внимание. Кроме того, если происходит обмен с дном, то результирующее изменение батиметрии должно влиять на последующие гидродинамические расчеты, а взаимодействие фракций осадка имеет значение для расчета локальной скорости затрудненного осаждения каждой фракции ВЗН.

Трехмерный перенос взвешенных наносов рассчитывается путем решения трехмерного уравнения адвекции–диффузии (баланса массы):

$$\frac{\partial C^{(l)}}{\partial t} + \left[\frac{\partial u C^{(l)}}{\partial x} + \frac{\partial v C^{(l)}}{\partial y} \right] + \frac{\partial (w - w_s^{(l)}) C^{(l)}}{\partial z} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \epsilon_{s,x}^{(l)} \frac{\partial C^{(l)}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \epsilon_{s,y}^{(l)} \frac{\partial C^{(l)}}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_{s,z}^{(l)} \frac{\partial C^{(l)}}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

где $C^{(l)}$ — массовая концентрация фракции с номером (l) ; u , v и w — компоненты скорости потока, м/с; $w_s^{(l)}$ — уменьшенная (затрудненная) из-за замутненности потока скорость осаждения частиц фракции с номером (l) , м/с; $\epsilon_{s,x}^{(l)}$, $\epsilon_{s,y}^{(l)}$, $\epsilon_{s,z}^{(l)}$ — коэффициенты турбулентной диффузии фракции с номером (l) .

Граничное условие на дне для уравнения (1) определяется выражением:

$$(-w_s^{(l)}) C^{(l)} - \epsilon_{s,z}^{(l)} \frac{\partial C^{(l)}}{\partial z} = D^{(l)} - E^{(l)}, \quad (2)$$

где $D^{(l)}$ — поток ВВ из воды в дно; $E^{(l)}$ — поток осадков со дна в воду для фракции (l) , кг/м²с. Выражения для $D^{(l)}$ и $E^{(l)}$ существенно различаются для связных и несвязных осадков⁴. Дополнительно описание связных и несвязных осадков отличается описанием скорости осаждения частиц. Также в модели учитывается влияние ВВ на плотность воды и коэффициенты турбулентной диффузии.

Для влекомых наносов моделирование переноса осуществляется по формулам ван Рейна [8–11]. В них различаются три части:

- S_{bc} — перенос влекомых наносов из-за течений;
- S_{bw} — перенос влекомых наносов из-за волн;
- S_{sw} — перенос взвешенных наносов из-за волн.

Модуль скорости переноса влекомых наносов $|S_b|$, на основе которого определяются эти составляющие, задается выражением, м³/мс:

$$|S_b| = 0,006 \alpha_s \rho_s w_s D_{50}^{(l)} M^{0,5} M_e^{(l)}, \quad (3)$$

где M — параметр подвижности отложений из-за волн и течений; M_e — дополнительный параметр подвижности отложений, $\alpha_s \sim 0,2/3$;

$$M = \frac{v_{eff}^2}{(s-1)gD_{50}},$$

$$M_e = \frac{(v_{eff} - v_{cr})^2}{(s-1)gD_{50}},$$

$$v_{eff} = \sqrt{v_R^2 + U_{on}^2},$$

где v_{cr} — усредненная скорость, основанная на критической скорости трения; v_R — величина эквивалентной усредненной по глубине скорости:

$$v_R = U, |U| = \frac{v_*}{\kappa} \ln \left(1 + \frac{H}{ez_0} \right),$$

$$v_{\delta_m} = v_k \ln \left(1 + \frac{z_{\delta_m}}{z_{0a}} \right) / \ln \left(1 + \frac{z_k}{z_{0a}} \right),$$

$$v_* = v_{\delta_m} \kappa / \ln \left(1 + \frac{z_{\delta_m}}{z_0} \right),$$

$$v_{cr} = U_{cr}, |U_{cr}| = \frac{v_{*,cr}}{\kappa} \ln \left(1 + \frac{H}{ez_0} \right),$$

$$v_{*,cr}^{(l)} = \sqrt{\frac{\tau_{cr}^{(l)}}{\rho_w}} = \left[(s-1)gD_{50}^{(l)}\theta_{cr}^{(l)} \right]^{1/2},$$

где δ_m — толщина волнового пограничного слоя смешения по ван Рейну (WBML); v_{δ_m} — скорость на высоте z_{δ_m} ($z = \delta_m$), $\delta_m = 3\delta_w$; δ_w — толщина волнового пограничного слоя ($\delta_m \geq k_a$); k_a — кажущаяся шероховатость при наличии волн и течений; z_k — расчетный слой, наиболее близкий к δ_m ; v_{cr} — критическая скорость для начала движения частиц (на основе параметризации кривой Шильдса [7]); U_{on} — придонная пиковая орбитальная скорость, основанная на значительной высоте волн. Где $C_{g,90}$ — коэффициент Шези, м^{1/2}/с; $C_{g,90} = C_0 \log_{10}(12H/k_{90})$; $C_0 = 18$, м^{1/2}/с $k_{90} = 3D_{90}$.

$$v_{*,cr}^2 = g(s-1)D_{50}\theta_{cr},$$

$$\theta_{cr} = \begin{cases} 0,24, & \text{если } D_* \leq 4, \\ 0,14, & \text{если } 4 < D_* \leq 10, \\ 0,04, & \text{если } 10 < D_* \leq 20, \\ 0,013, & \text{если } 20 < D_* \leq 150, \\ 0,055, & \text{если } 150 < D_*. \end{cases}$$

Чтобы оценить выражение (3), необходимо вычислить следующие величины:

$D_{50}^{(l)}$ — медианный диаметр осадков;

$D_*^{(l)}$ — безразмерный диаметр частиц фракции (l) : $D_*^{(l)} = D_{50}^{(l)} \left[\frac{(s^{(l)}-1)g}{v^2} \right]^{1/3}$;

$\rho_s^{(l)}$ — удельная плотность фракции (l) ;

$\rho_s^{(l)}$ — удельная плотность фракции (l) ;

ρ_s — удельная плотность осадков;
 ν — коэффициент кинематической вязкости воды;

$s^{(l)}$ — относительная плотность $\rho^{(l)} / \rho_w$ фракции (l).

Направление вектора переноса ВлН определяется тем, что он составлен из двух частей: части, обусловленной течением $S_{b,c}$, направление которой совпадает с придонным течением, и части, обусловленной волнами $S_{b,w}$, направление которой совпадает с направлением распространения волн. Эти части определяются следующим образом:

$$S_{b,c} = \frac{S_b}{\sqrt{1+r^2+2|r|\cos\varphi}},$$

$$|S_{b,w}| = r|S_{b,c}|,$$

где $r = (|U_{on}| - v_{cr})^3 / (|v_R| - v_{cr})^3$; $S_{b,w} = 0$, если $r < 0,01$; $S_{b,c} = 0$, если $r > 100$; φ — угол между направлением течения и волн. Связанный с волнами перенос взвешенных наносов $S_{s,w}$ моделируется с использованием выражения:

$$S_{s,w} = f_{SUSW} \gamma U_A L_T,$$

где f_{SUSW} — параметр настройки; $\gamma (= 0,2)$ — коэффициент запаздывания фазы; $U_A = U_{on}^4 - U_{off}^4 / U_{on}^3 + U_{off}^3$ — значение асимметрии скорости; $L_T = 0,007 \rho_s D_{50}^{(l)} M_e^{(l)}$ — взвешенные отложения. Направление переноса из-за течения $S_{b,c}$ предполагается равным направлению течения, тогда как два связанных с волнами транспортных компонента $S_{b,w}$ и $S_{s,w}$ принимают направление распространения волн. В результате получаются следующие транспортные компоненты (φ — локальный угол между направлением распространения волн и расчетной сеткой):

$$S_{bc,u} = |S_{b,c}| u_{b,u} / |u_b|,$$

$$S_{bc,v} = |S_{b,c}| u_{b,v} / |u_b|,$$

$$S_{bw,u} = |S_{b,w}| \cos(\varphi),$$

$$S_{bw,v} = |S_{b,w}| \sin(\varphi),$$

$$S_{sw,u} = |S_{s,w}| \cos(\varphi),$$

$$S_{sw,v} = |S_{s,w}| \sin(\varphi).$$

Численное моделирование ветровой циркуляции, волновых и литодинамических процессов проведено на акватории всего Каспийского моря с использованием подхода с составными расчетными сетками (рис. 1, 2). Северная сетка покрывает СК и имеет шаг 1 км и размер 531 на 232 ячеек. На ней отражаются отдельные каналы и русла притоков, а также разрешаются особенности рельефа (рис. 1). Граничные условия задавались на северной границе в виде суточного расхода q . Волги и Урала и значе-

ний концентраций отдельных фракций. Южная сетка с достаточно крупным пространственным шагом покрывает Средний и Южный Каспий. Она состоит из 132 ячеек в долготном и 192 ячеек в широтном направлении. Шаг в обоих направлениях равен 5 км. В этом случае прорези каналов и другие мелкие детали рельефа и береговой линии, естественно, не разрешались (рис. 2).

Расчеты велись одновременно на обеих сетках с обменом информацией между ними для реализации ГУ. Расчеты на составных сетках необходимы по двум причинам: во-первых, проведение расчетов для всего Каспия с шагом 1 км для разрешения особенностей рельефа в СК требует больших ресурсов компьютера с учетом того, что продолжительность расчетов может быть 0,5–1 год; во-вторых, для расчета только на сетке СК необходимо задавать ГУ на южной границе, которые неизвестны.

Входные данные, необходимые для моделирования, по стоку, рельефу и грунтам приведены в публикациях [14–16]. Учитывая преобладание тонких фракций в составе донных отложений СК, можно отметить, что динамика наносов в значительной степени определяется переносом взвешенных частиц. При этом общая направленность и интенсивность транспорта и накопления осадков связана с особенностями гидродинамического воздействия на донные отложения. Вследствие мелководности Северного Каспия интенсивность волнового воздействия на донные осадки и его вклад в процессы механической дифференциации наносов на фоне поступления большого количества тонкодисперсного материала с речным стоком невелики.

Поскольку донные отложения в данном районе характеризуются высоким содержанием алевропелитовых частиц, то они обладают значительной связностью, низкой пористостью и практически не подвержены разжижению. По своему происхождению взвешенные осадки в районе СК представляют собой взвесь, выносимую речным стоком и образующуюся вследствие размыва дна, а также органогенную взвесь. При этом определяющим фактором в транспорте наносов является поступление взвеси с речным стоком. Состав взвешенных наносов, поступающих в зону устьевоего взморья с волжскими водами, характеризуется следующим соотношением: частицы размерами 0,5–0,25 мм составляют 0,3 %, 0,25–0,05 мм — около 25 %, 0,05–0,01 мм — 38 %, менее 0,01 мм — 36 %. Наиболее полные данные по фоновым концентрациям взвеси и динамике ВлН получены на Волго-Каспийском плавмаяке, расположенном в 90 км к югу от дельты Волги. Анализ годового цикла выполненных наблюдений показал, что за безледный период в среднем отмечалось 84 случая превышения принятого значения «фоновой» концентрации взвеси (20 г/м³), при этом более часто такие случаи наблюдались весной и осенью, соответственно

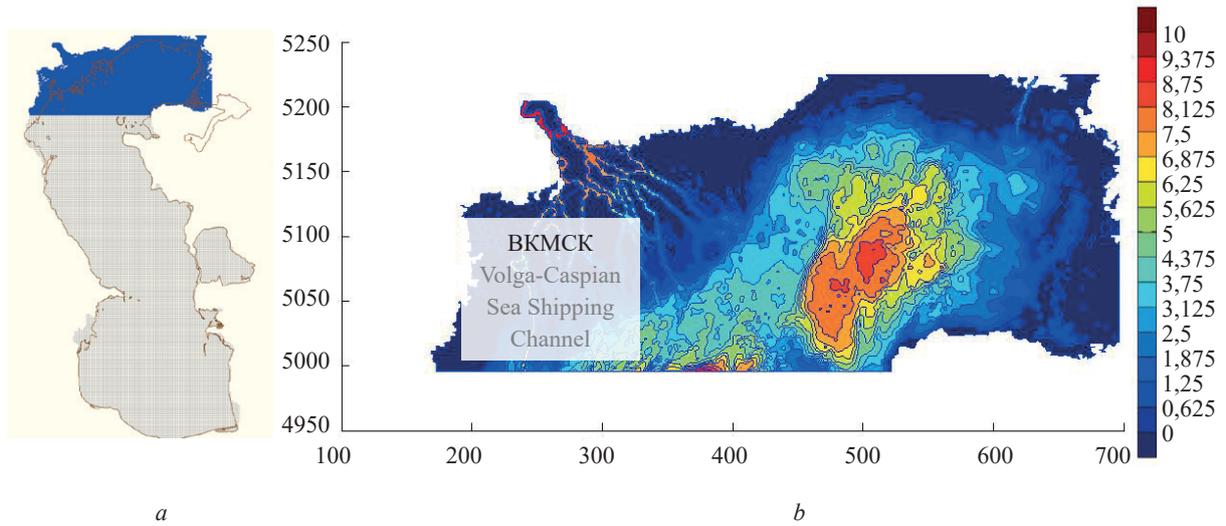


Рис. 1. Модельная сетка с шагом 1 км (а) и батиметрия (б) Северного Каспия

Fig. 1. Model grid with a step of 1 km (a) and bathymetry (b) of the Northern Caspian Sea

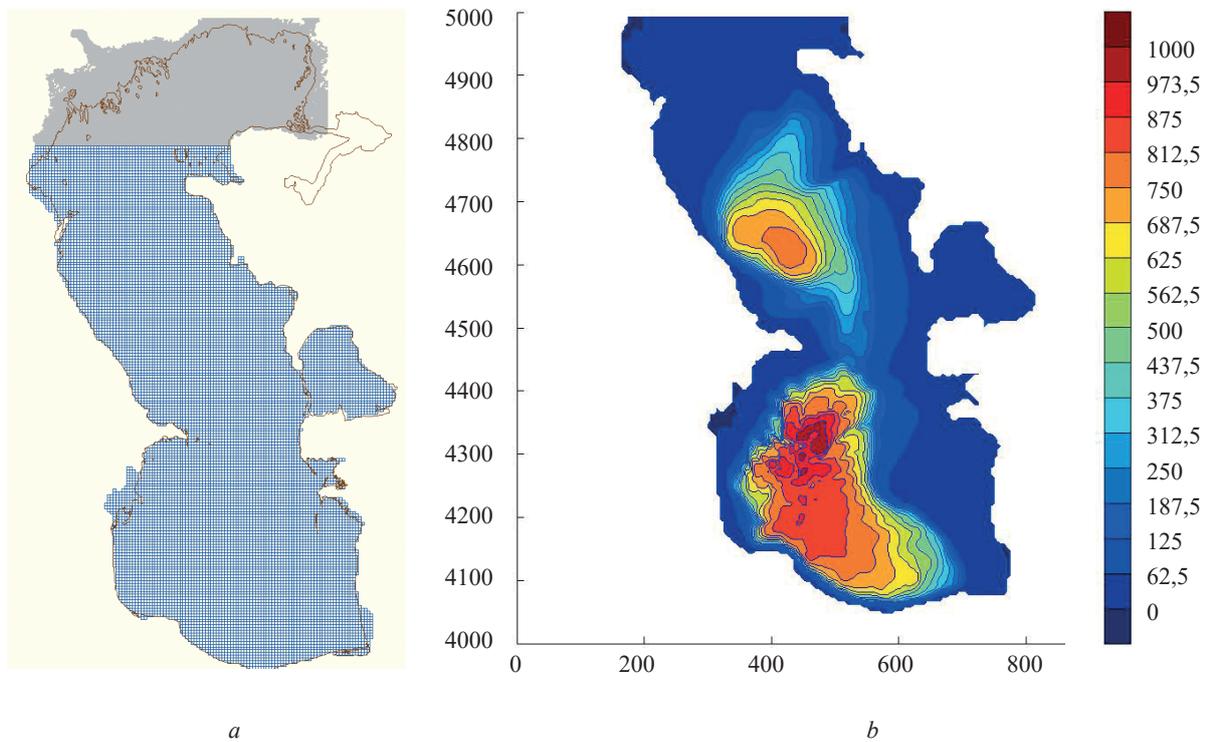


Рис. 2. Модельная сетка с шагом 5 км (а) и батиметрия (б) Центрального и Южного Каспия

Fig. 2. Model grid with a step of 5 km (a) and bathymetry (b) of the central and southern parts of the Caspian Sea

11 и 13 случаев в месяц. В летний период — 7–9 случаев превышения «фоновой» концентрации в месяц.

Средние значения концентрации взвеси в придонном слое превысили «фоновые» приблизительно в 2 раза. Максимальные зарегистрированные значения концентрации взвеси составили 400 г/м^3 на поверхности и 550 г/м^3 у дна. Средняя продолжительность фазы взмучивания, при которой отмечалось нарастание концентрации взвеси, — около 20 часов, а фазы последующе-

го осаждения взвеси около 30 ч. При умеренном волнении концентрация взвеси в поверхностном слое составила 0,3 от концентрации взвеси в придонном слое, при сильных штормах различия в концентрации взвеси у дна и на поверхности незначительны [14].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в районе приблизительно в 35 % случаев отмечаются условия размыва и перетолжения донных осадков. При типичных штормовых условиях (ско-

рость ветра 18–20 м/с) концентрация взвешенных наносов составляет около 200 г/м³. Величина расхода ВЗН при скорости течения 0,5 м/с составляет 0,5 кг/(с·м). При сильных штормах концентрация ВЗН может достигать 500 г/м³ и более. В этом случае при скорости течения 1 м/с величина расхода наносов может составить до 2,5 кг/(с·м)⁶.

В качестве основы для построения цифровых полей грансостава на километровой сетке СК послужили материалы из работ [17–20]. Дополнительно собраны данные о гранулометрическом составе донных осадков за последние годы, выполненные различными организациями: ООО «Инэко Каспий»⁷, ООО «Петроресурс»⁸, КаспНирх¹⁰, ООО «Моринжгеология»¹¹ и др. В составе донных отложений Северного Каспия преобладают илистые пески, ракушка, местами встречаются пятна илистых осадков. Картирование донных грунтов, проведенное в разные годы, указывает на значительную изменчивость состава донных отложений. Наиболее значительная пространственная неоднородность и временная изменчивость состава донных осадков отмечается вблизи мелководных банок, где чередуются ракушечные, песчаные и илистые осадки. В моделировании используются шесть градаций гранулометрического состава: 1 — глина ($d_{50} = 5$ мкм); 2 — мелкий ил ($d_{50} = 7,5$ мкм); 3 — крупный ил ($d_{50} = 30$ мкм); 4 — мелкий песок ($d_{50} = 175$ мкм); 5 — средний песок ($d_{50} = 375$ мкм); 6 — крупный песок ($d_{50} = 750$ мкм). Первые три фракции по классификации Delft3D относятся к типу связанных осадков (илы), остальные к типу несвязных осадков (пески). Мелкие фракции с $d_{50} = 5–30$ мкм больше встречаются в районе морского края дельты (МКД) и севернее, ближе к дельте Волги. Фракции, характерные для песков с $d_{50} = 175–750$ мкм, больше встречаются на востоке СК или на юго-западе.

Волго-Каспийский канал является главным водным путем, соединяющим порт Астрахань с открытым морем. В 2005 г. был составлен обновленный Паспорт Волго-Каспийского канала¹². Морская часть канала прорыта через мелководную северную часть Каспийского моря и проходит

мимо о-ва Искусственный (45°24' с.ш., 47°47' в.ш.) до входа в рукав Бахтемир, или Ракуша, который начинается в 18 милях к NNW от о-ва Искусственный. Далее канал тянется до пос. Красные Баррикады, у которого расположен нулевой пикет Волго-Каспийского канала, от которого отсчитывается его длина.

Отсчет километров на канале ведется от пос. Красные Баррикады в сторону моря. Общая протяженность канала от начала морской части до пос. Красные Баррикады (с. Бертуль) составляет 188 км. Морская часть канала имеет протяженность 102,0 км. Речная часть канала протяженность — 86,0 км. Начало сооружения канала приходится на 1874 г.

Морская часть канала состоит из четырех колен. У первого колена направление — 355–175°, длина колена — 18 км между пикетами 188–170 км. Второе колено начинается от точки (44°55,5'N, 47°44,5'E) и имеет направление 347,3–167°, его длина — 18,7 км между пикетами 170–151,3 км. Третье колено начинается от параллели 45°05,35' с.ш. и имеет направление 13–193°, его длина — 34,6 км между пикетами 151,3–116,7 км. Четвертое колено начинается у о-ва Искусственный и тянется по направлению 349–169°, длина колена — 30,7 км (116,7–86,0 км). Речная часть канала проходит по извилистому рукаву Бахтемир. Этот рукав является одним из самых длинных и глубоководных рукавов дельты р. Волги.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Построение полной математической модели литодинамических процессов, происходящих в СК, учитывающей совокупное воздействие различных природных факторов, осложнено рядом обстоятельств. Отметим среди них следующие:

- временная (межгодовая, сезонная) изменчивость ряда природных факторов, оказывающих существенное влияние на литодинамические процессы;
- необходимость одновременного учета как постоянно действующего речного стока, так и шторм-

⁶ Определение расчетных гидрометеорологических характеристик в районе структуры Ракушечная : научно-технический отчет. Научно-исследовательский центр КаспНИЦ. Компания ИНФОМАР. Санкт-Петербургское отделение Государственного океанографического института. Астрахань, 2000.

⁷ Протокол испытаний № 101.17. ПГ от 04.10.2017.

⁸ Протокол испытаний № 133.17. ПГ от 20.11.2017.

⁹ Инженерно-геодезические и инженерно-геологические изыскания на структуре «Морская» (Каспийское море). М. : ООО «Петроресурс», 2006.

¹⁰ НТО «Расчет водного баланса и баланса загрязняющих веществ с использованием гидродинамической модели высокого разрешения и данных наблюдений за загрязнением морских вод до и после проведения сейсморазведочных работ». Астрахань : ООО «ИНФОМАРУС», КаспНирх, 2019.

¹¹ Технический отчет «О результатах инженерно-геологических изысканий на площадке № 1 структуры «Западно-Ракушечная» (Каспийское море)» в 3-х книгах. Книга 1: «Обобщение и анализ результатов изысканий». Астрахань : ООО «Моринжгеология», 2007.

¹² Паспорт Волго-Каспийского канала. Ростов н/Д : ОАО «РЦПКБ «Стапель», 2005.

мовых воздействий с учетом характеристик их повторяемости;

- влияние стока многочисленных рукавов Волги на гидродинамический и литодинамический режимы прилегающей акватории;
- влияние колебаний уровня Каспия на гидродинамический и литодинамический режимы прилегающей акватории;
- пространственная неоднородность литодинамических характеристик донных осадков;
- сложность описания границы «суша – море»;
- необходимость явно разрешать при численном моделировании множество мелких деталей рельефа и береговой линии (прорезь канала, отдельные острова, небольшие прораны и протоки в защитных дамбах, свалки грунта и т.п.);
- отсутствие многих исходных данных, необходимых для проведения моделирования в такой постановке;
- несовершенство моделей;
- большое количество входных данных (batimетрия, реки, ветер, донные осадки), которые задаются приближенно, например, глубины для СК задаются на сетке 1000 м, что грубо, требуется меньший шаг, но его уменьшение приводит к резкому увеличению трудоемкости расчетов, так один расчет (7 мес. модельного времени) на двух сетках (Северная сетка покрывает СК и имеет шаг 1 км и размер 531 на 232 ячейки; Южная сетка с достаточно крупным пространственным шагом покрывает Средний и Южный Каспий, она состоит из 132 ячеек в долготном и 192 ячеек в широтном направ-

лении, шаг в обоих направлениях равен 5 км) занимает около восьми суток на процессоре Intel(R) Core (TM) i7-7740X CPU@ 4.30GHz;

- особенно сложно задать карту донных осадков в силу высокой пространственной и временной изменчивости, обобщенные сведения в монографиях имеют качественный характер, современные данные имеются в конечном числе станций, невозможно задать и учесть в модели их стратификацию и т.п.;
- несовпадение точек, где нужно моделировать и где имеются данные.

Принятый в работе подход состоит в вычислении течений, волн, а также величины потока наносов и изменения дна, одновременно на двух сетках с обменом информацией между ними для реализации ГУ. Моделирование проводилось в период с 01.01.2015 по 31.07.2015, т.е. на семь месяцев. Результаты моделирования приведены на рис. 4–9 в двух вариантах: в первом приводится изменение величин по времени в наборе точек, показанных на рис. 3, во втором — плановые карты соответствующих характеристик.

На рис. 4 показан график изменения высоты значительных волн, полученных в точке 73,7, из которого следует, что за период расчетов максимальная высота волн наблюдалась 29.03.2015.

Высота и направление значительных волн в районе СК, полученных на 29.03.2015, представлены на рис. 5, 6. Волны имеют юго-западное направление высотой 0,5–1,5 м. Средний период меняется от 0,4 до 3,6 с, а средняя длина волн — от 1 до 14 м.

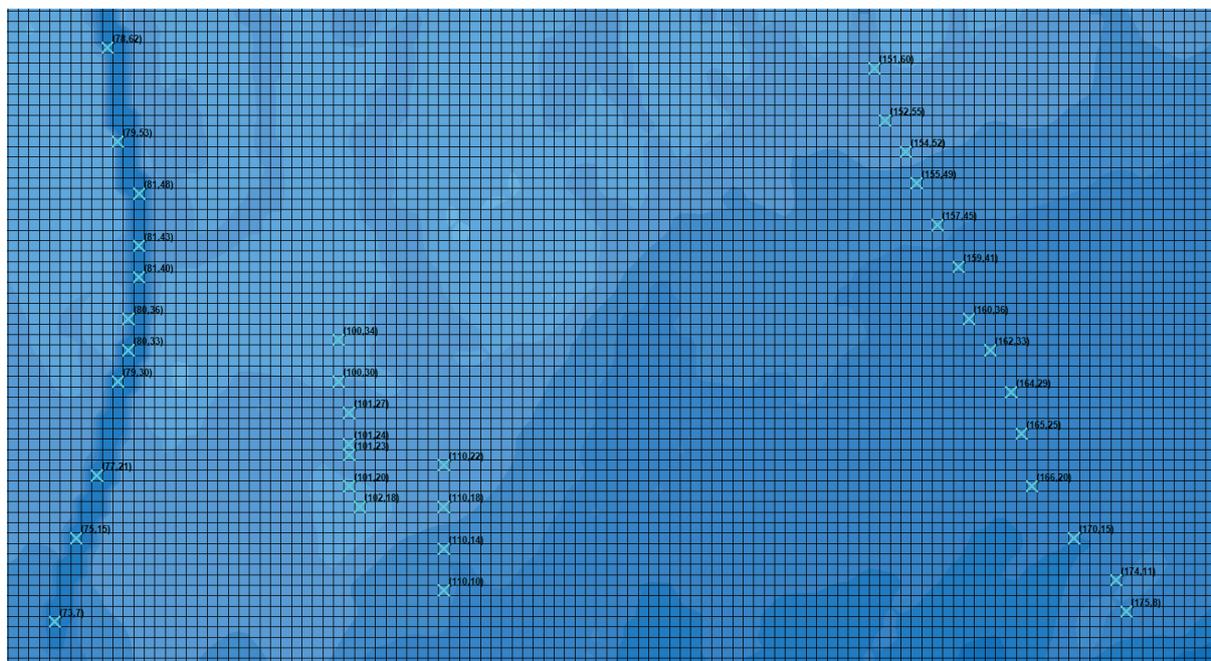


Рис. 3. Положение расчетных точек на сетке СК. График кумулятивного накопления осадков, м, полученного в моделировании в районе второго колена, приведен для точки 75,15

Fig. 3. Position of computational points on the SC grid. The graph of cumulative sediment accumulation, m, obtained as a result of simulation in the area of the second sweep, is provided for point 75.15

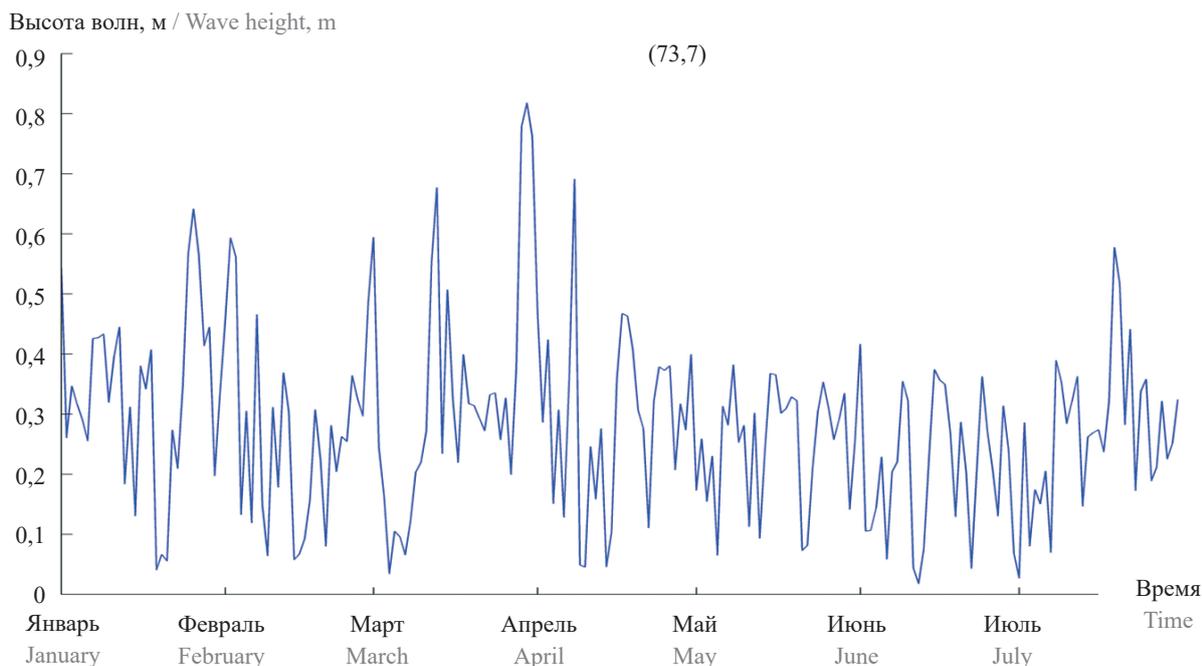


Рис. 4. Высота значительных волн в СК в точке 73,7

Fig. 4. The height of significant waves in the Northern Caspian at point 73.7

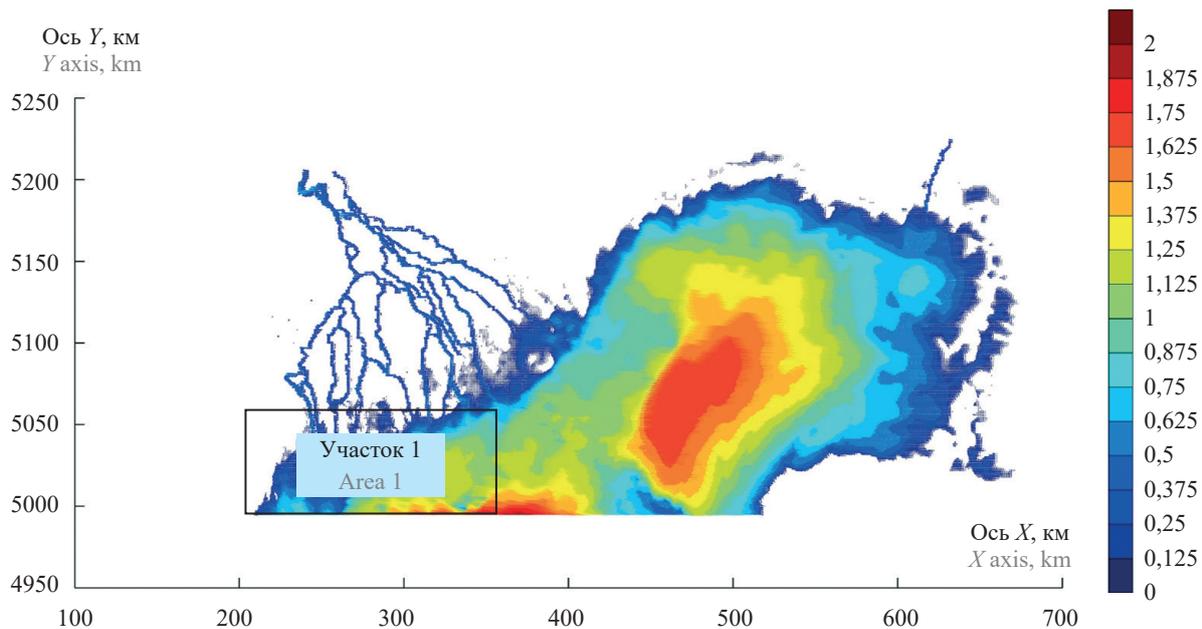


Рис. 5. Высота значительных волн, полученных в СК на 29.03.2019

Fig. 5. The height and direction of significant waves obtained using the local grid on 29.03.2019

Придонная орбитальная скорость волн изменяется от 0,04 до 0,6 м/с. Отметим, что волны в область северо-западнее МКД практически не проникают. В основном заметные волны наблюдаются вдоль оси наибольших глубин с юго-запада на северо-восток.

Осредненные за 210 суток величины потока наносов показаны на рис. 7 для СК. Вдольбереговой

поток наносов в области МКД имеет юго-западное направление, его величина — около 0,1 кг/(с·м).

На рис. 8 показан график кумулятивного накопления осадков, м, полученный в моделировании в районе второго колена ВКМСК на сетке для СК в точке 75,15 (см. рис. 3). Из графика следует, что за семь месяцев (продолжительность моделирования) аккумуляция в точке 75,15 достигает примерно 0,28 м.

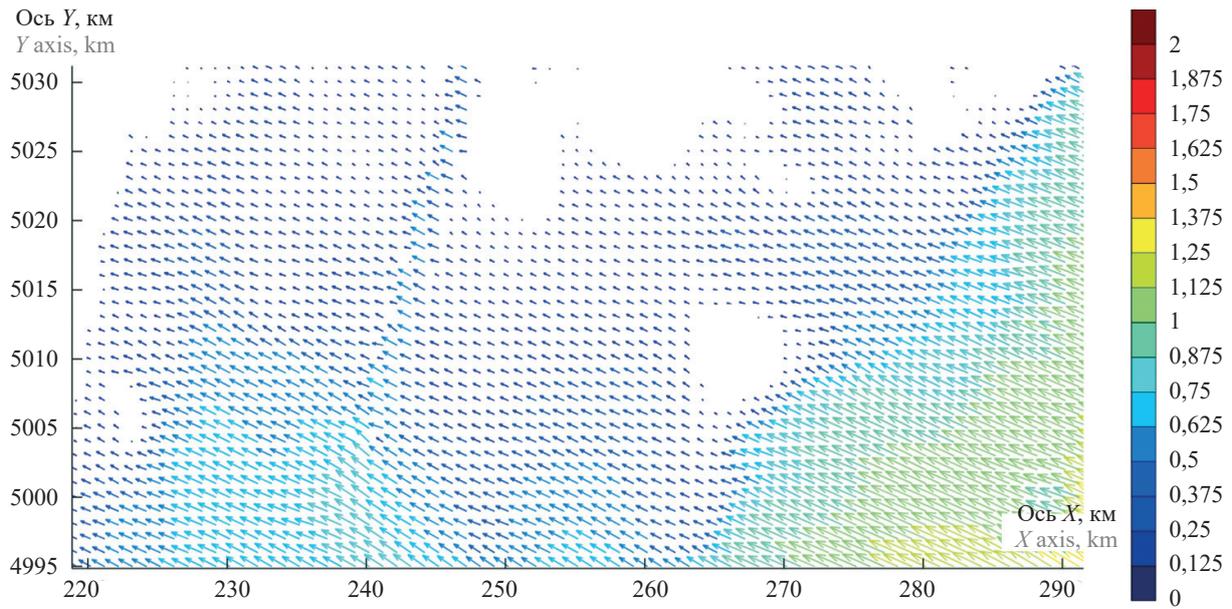


Рис. 6. Высота и направление значительных волн на участке 1 на 29.03.2019

Fig. 6. The height and direction of significant waves obtained using the local grid on 29.03.2019

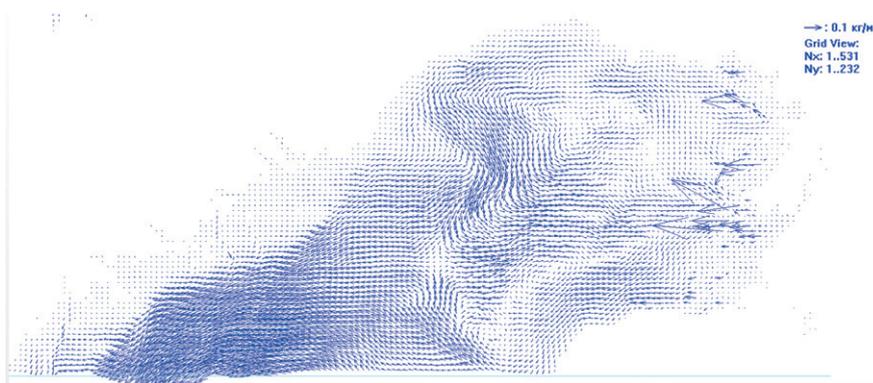


Рис. 7. Осредненные за 210 суток потоки наносов в единицах, 0,1 кг/мс

Fig. 7. Sediment flows, in units, averaged over 210 days, 0.1 kg/ms

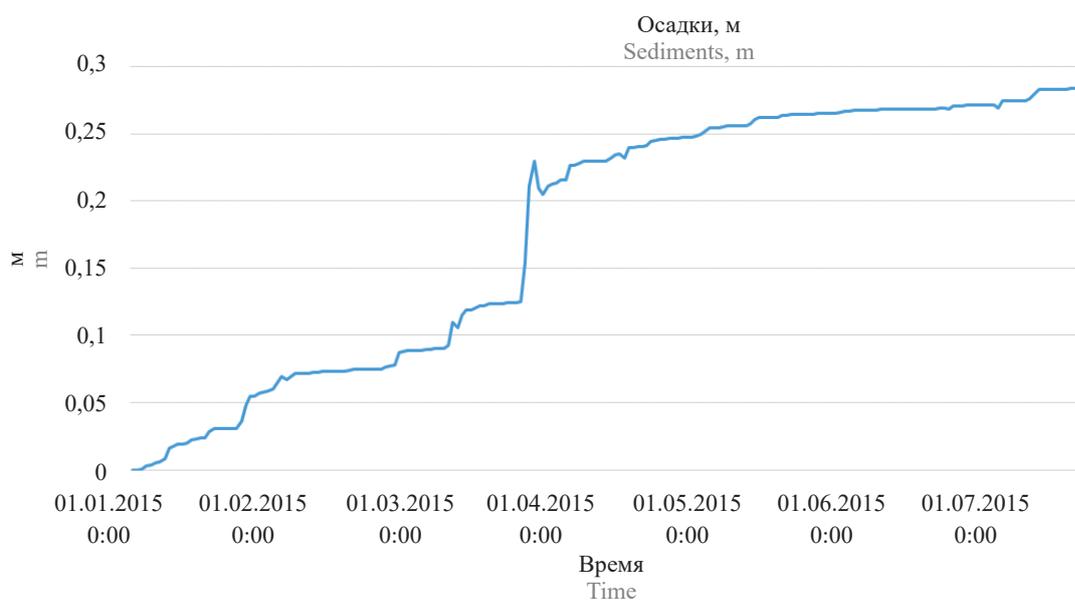


Рис. 8. Кумулятивные осадки, м, в моделировании в районе второго колена, полученные на сетке для СК в точке 75,15

Fig. 8. Cumulative sediments, in m, simulated in the area of the second sweep and obtained using the grid for the SC at point 75.15

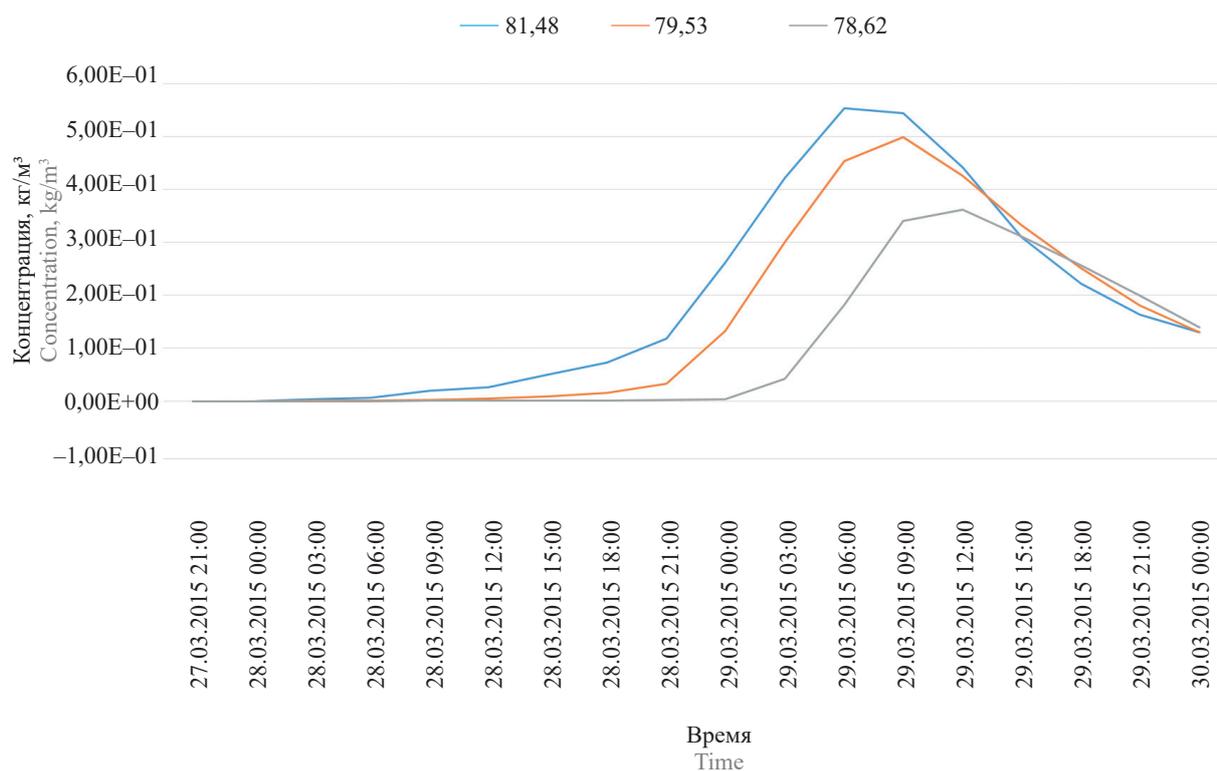


Рис. 9. Изменение концентрации, кг/м³, во время шторма 29.03.2015 в моделировании, полученное на сетке для СК в точках 81,48; 79,53; 78,62

Fig. 9. A simulated change in concentration, kg/m³, during the storm on March 29, 2015, obtained using the grid developed for SC at points 81.48; 79.53; 78.62

Для сравнения скорости заносимости были привлечены данные по ремонтным дноуглубительным работам на ВКМСК в 1999–2003 гг.¹³ Объемы грунта на участках дноуглубительных работ, выполненные за период 1999–2003 гг., в среднем за приведенный срок составили 532 589 м³/год для второго колена, что составляет 28,5 м³/м/год (кубических метров на погонный метр участка канала в год). Учитывая ширину канала для второго колена (65 м), получаем оценку заносимости за 7 месяцев $\Delta h \sim \frac{7 \cdot 28,5}{12 \cdot 65} \sim 0,26$ м/(7 мес.). Это значение близко к величине, полученной в моделировании.

На рис. 9 приведены графики изменения концентрации, кг/м³, полученные в моделировании во время шторма 29.03.2015 на сетке для СК в точках 81,48; 79,53; 78,62 (см. рис. 3). Из этого графика следует, что концентрация достигает величин 500–600 г/м³, эти значения близки к величине, полученной в наблюдениях (см. раздел Материалы и методы, а также отчет⁷).

Столь большая энергия седиментации обуславливает высокие риски увеличения капитальных и операционных затрат при строительстве и под-

держании новых гидротехнических сооружений. Использование указанных моделей и расчетов при проектировании искусственных островов, траншей и подходов судоходных каналов в Северо-Западном Каспии (СЗК) позволит сформировать соответствующие рекомендации как с целью оптимизации проектных решений, так и учета данных факторов при оценке экономической эффективности новых морских нефтегазовых проектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Впервые проведены расчеты гидродинамических, волновых и литодинамических процессов в Каспийском море одновременно на глобальной сетке для Среднего и Южного Каспия и на локальной сетке для Северного Каспия с обменом информацией между ними для реализации ГУ. Расчеты на составных сетках необходимы по двум причинам: во-первых, проведение расчетов для всего Каспия с шагом 1 км для разрешения особенностей рельефа в СК требует больших ресурсов компьютера с учетом того, что продолжительность расчетов может быть 0,5–1 год; во-вторых, для расчета только на сетке СК необходимо задавать ГУ на южной

¹³ Дампинг на Волго-Каспийском канале в условиях повышения уровня Каспийского моря : технический отчет. М. : Государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт морского транспорта (Союзморнипроект). Астраханский комплексный проектно-изыскательский отдел, 1999.

границе, которые неизвестны. Показано, что усредненный вдольбереговой поток наносов в области МКД имеет юго-западное направление. Дана оценка его величины. Приведены данные по заносимости ВКМСК в области второго колена, полученные в моделировании, и показано, что они близки к данным

заносимости ВКМСК, полученным по ремонтным дноуглубительным работам. Графики изменения концентрации, $\text{кг}/\text{м}^3$, полученные в моделировании во время шторма 29.03.2015 на сетке для СК в точках 81,48; 79,53; 78,62, оказываются близки к данным наблюдений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
2. Lesser G.R., Roelvink J.A., van Kester J.A.T.M., Stelling G.S. Development and validation of a three-dimensional morphological model // *Coastal Engineering*. 2004. Vol. 51. Issue 8, 9. Pp. 883–915. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2004.07.014
3. Lane A. Development of a Lagrangian sediment model to reproduce the bathymetric evolution of the Mersey estuary // *Ocean Dynamics*. 2005. Vol. 55. Issue 5, 6. Pp. 541–548. DOI: 10.1007/s10236-005-0011-8
4. Blaas M., Dong C., Marchesiello P., McWilliams J., Stolzenbach K. Sediment-transport modeling on Southern Californian shelves: A ROMS case study // *Continental Shelf Research*. 2007. Vol. 27. Issue 6. Pp. 832–853. DOI: 10.1016/j.csr.2006.12.003
5. Warner J.C., Sherwood C.R., Signell R.P., Harris C.K., Arango H.G. Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model // *Computers & Geosciences*. 2008. Vol. 34. Issue 10. Pp. 1284–1306. DOI: 10.1016/j.cageo.2008.02.012
6. Кривицкий С.В., Архипов Б.В., Солбаков В.В., Соловьев М.Б. Заносимость отдельных участков Волго-Каспийского морского судоходного канала // *Вестник МГСУ*. 2013. № 6. С. 177–188.
7. Shields A. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitt. Preuss. Versuchsanst. Wasserbau Schiffbau, 26, 26. 1936. (English translation by W.P. Ott and J.C. van Uchelen, p. 36, U.S. Dep. of Agric. Soil Conser. Serv. Coop. Lab., Calif., Inst. of Technol., Pasadena, 1936).
8. Van Rijn L.C. Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport // *Journal of Hydraulic Engineering*. 2007. Vol. 133. Issue 6. Pp. 649–667. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(2007)133:6(649)
9. Van Rijn L.C. Sediment transport, Part I: Bed load transport // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1984. Vol. 110. Issue 10. Pp. 1431–1456. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1984)110:10(1431)
10. Van Rijn L.C. Sediment transport, Part II: Suspended load transport // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1984. Vol. 110. Issue 11. Pp. 1613–1641. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1984)110:11(1613)
11. Van Rijn L.C. Sediment transport, Part III: Bed forms and alluvial roughness // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1984. Vol. 110. Issue 12. Pp. 1733–1754. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1984)110:12(1733)
12. Gaeuman D., Andrews E.D., Krause A., Smith W. Predicting fractional bed load transport rates: Application of the Wilcock-Crowe equations to a regulated gravel bed river // *Water Resources Research*. 2009. Vol. 45. Issue 6. DOI: 10.1029/2008WR007320
13. Lee C., Schwab D.J., Hawley N. Sensitivity analysis of sediment resuspension parameters in coastal area of southern Lake Michigan // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2005. Vol. 110. Issue C3. DOI: 10.1029/2004JC002326
14. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Каспийское море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия / под ред. А.А. Керимова, А.Н. Косарева, Ф.С. Терзиева. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 359 с.
15. Панин Г.Н., Мамедов Р.М., Митрофанов И.В. Современное состояние Каспийского моря. М.: Наука, 2005. 355 с.
16. Архипов Б.В., Котеров В.Н., Солбаков В.В., Шапочкин Д.А. Моделирование турбулентного рассеивания загрязняющих веществ в морской среде: монография. М.: ВЦ РАН, 2005. 52 с.
17. Гершанович Д.Е., Зинковский А.Б. Новые данные о взвешенных веществах Каспийского моря // *Океанология*. 1987. Т. 27. № 1. С. 100–107.
18. Катунин Д.Н., Хрипунов И.А. Динамика грунтов северной части Каспийского моря // *Известия Всесоюзного географического общества*. 1971. Т. 103. № 5. С. 469–473.
19. Хрипунов И.А., Катунин Д.Н., Азаренко А.В. Многолетние изменения гранулометрического состава и пространственного распределения донных отложений Северного Каспия // *Водные ресурсы*. 2010. Т. 37. № 6. С. 709–716.
20. Гребнев Ю.С., Жиндарев Л.А. Принципы и методы защиты берегов и прибрежных территорий Каспийского побережья России // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 1993. № 3. С. 63–67.

Поступила в редакцию 11 марта 2022 г.

Принята в доработанном виде 15 апреля 2022 г.

Одобрена для публикации 29 апреля 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: **Борис Витальевич Архипов** — кандидат физико-математических наук, ведущий математик, отделение № 2; **Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН)**; 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2; РИНЦ ID: 1907; arh12.bor12@yandex.ru;

Дмитрий Алексеевич Шапочкин — ведущий программист, отделение № 2; **Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН)**; 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2; РИНЦ ID: 599428; shap@progtex.ru;

Александр Львович Лобов — кандидат географических наук, старший научный сотрудник; **Гидрометцентр России**; 123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., д. 13, стр. 1; РИНЦ ID: 64842; lmpi@yandex.ru;

Владимир Иванович Батов — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник; **Гидрометцентр России**; 123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., д. 13, стр. 1; lmpi@yandex.ru;

Ольга Васильевна Тихонова — научный сотрудник; **Гидрометцентр России**; 123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., д. 13, стр. 1; lmpi@yandex.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Leontiev I.O. *Coastal dynamics: waves, currents, sediment transport*. Moscow, GEOS, 2001; 272. (rus.).
2. Lesser G.R., Roelvink J.A., van Kester J.A.T.M., Stelling G.S. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*. 2004; 51(8-9):883-915. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2004.07.014
3. Lane A. Development of a Lagrangian sediment model to reproduce the bathymetric evolution of the Mersey estuary. *Ocean Dynamics*. 2005; 55(5-6):541-548. DOI: 10.1007/s10236-005-0011-8
4. Blaas M., Dong C., Marchesiello P., McWilliams J., Stolzenbach K. Sediment-transport modeling on Southern Californian shelves: A ROMS case study. *Continental Shelf Research*. 2007; 27(6):832-853. DOI: 10.1016/j.csr.2006.12.003
5. Warner J.C., Sherwood C.R., Signell R.P., Harris C.K., Arango H.G. Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Computers & Geosciences*. 2008; 34(10):1284-1306. DOI: 10.1016/j.cageo.2008.02.012
6. Krivitskiy S.V., Arkhipov B.V., Solbakov V.V., Solov'ev M.B. Sediment transport in specific areas of Volga-Caspian Shipping Canal. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 6:177-188. (rus.).
7. Shields A. *Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung*. Mitt. Preuss. Versuchsanst. Wasserbau Schiffbau, 26, 26. 1936. (English translation by W.P. Ott and J.C. van Uchelen, p. 36, U.S. Dep. of Agric. Soil Conser. Serv. Coop. Lab., Calif., Inst. of Technol., Pasadena, 1936).
8. Van Rijn L.C. Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2007; 133(6):649-667. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(2007)133:6(649)
9. Van Rijn L.C. Sediment transport, Part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1984; 110(10):1431-1456. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1984)110:10(1431)
10. Van Rijn L.C. Sediment transport, Part II: Suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1984; 110(11):1613-1641. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1984)110:11(1613)
11. Van Rijn L.C. Sediment transport, Part III: Bed forms and alluvial roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1984; 110(12):1733-1754. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1984)110:12(1733)
12. Gaeuman D., Andrews E.D., Krause A., Smith W. Predicting fractional bed load transport rates: Application of the Wilcock-Crowe equations to a regulated gravel bed river. *Water Resources Research*. 2009; 45(6). DOI: 10.1029/2008WR007320
13. Lee C., Schwab D.J., Hawley N. Sensitivity analysis of sediment resuspension parameters in coastal area of southern Lake Michigan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2005; 110(C3). DOI: 10.1029/2004JC002326
14. *Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas. Caspian Sea. Issue. 1: Hydrometeorological conditions* / ed. Kerimov A.A., Kosarev A.N., Terziev F.S. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 1992; 359. (rus.).
15. Panin G.N., Mammadov R.M., Mitrofanov I.V. *Present state of the Caspian Sea*. Moscow, Nauka Publ., 2005; 355. (rus.).
16. Arkhipov B.V., Koterov V.N., Solbakov V.V., Shapochkin D.A. *Modeling of turbulent dispersion of pollutants in the marine environment : monograph*.

Moscow, Computing Center of the Russian Academy of Sciences, 2005; 52. (rus.).

17. Gershanovich D.E., Zinkovsky A.B. New data on suspended solids of the Caspian Sea. *Oceanology*. 1987; 27(1):100-107. (rus.).

18. Katunin D.N., Khripunov I.A. Dynamics of soils of the northern part of the Caspian Sea. *News of the All-Union Geographical Society*. 1971; 103(5):469-473. (rus.).

19. Khripunov I.A., Katunin D.N., Azarenko A.V. Long-term variations in the granulometric composition and spatial distribution of bottom sediments in the northern Caspian Sea. *Water Resources*. 2010; 37(6):834-841. (rus.).

20. Grebnev Yu.S., Zhindarev L.A. Principles and methods of protection of the shores and coastal territories of the Caspian coast of Russia. *Bulletin of Moscow University. Episode 5: Geography*. 1993; 3:63-67. (rus.).

Received March 11, 2022.

Adopted in revised form on April 15, 2022.

Approved for publication on April 29, 2022.

B I O N O T E S: **Boris V. Arkhipov** — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Mathematician, Department No. 2; **Federal Research Center “Informatics and Management” of the Russian Academy of Sciences**; build. 2, 44 Vavilova st., Moscow, 119333, Russian Federation; ID RISC: 1907; arh12.bor12@yandex.ru;

Dmitry A. Shapochkin — Leading Programmer, Department No. 2; **Federal Research Center “Informatics and Management” of the Russian Academy of Sciences**; build. 2, 44 Vavilova st., Moscow, 119333, Russian Federation; ID RISC: 599428; shap@progtech.ru;

Alexander L. Lobov — Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher; **Hydrometeorological Center of Russia**; build. 1, 13 Bolshoi Predtechensky Lane, Moscow, 123242, Russian Federation; ID RISC: 64842; lmpi@yandex.ru;

Vladimir I. Batov — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher; **Hydrometeorological Center of Russia**; build. 1, 13 Bolshoi Predtechensky Lane, Moscow, 123242, Russian Federation; lmpi@yandex.ru;

Olga V. Tikhonova — Researcher; **Hydrometeorological Center of Russia**; build. 1, 13 Bolshoi Predtechensky Lane, Moscow, 123242, Russian Federation; lmpi@yandex.ru.

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

The authors declare that there is no conflict of interest.

Модернизация установок обратного осмоса, используемых для питьевого водоснабжения, с целью сокращения эксплуатационных затрат

Алексей Германович Первов, Дмитрий Владимирович Спицов

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Предложена технология модернизации установок с целью сокращения эксплуатационных затрат и сокращения сбросов концентратов в канализацию, состоящая в замене обратноосмотических мембран на нанофильтрационные. Применение нанофильтрационных мембран позволяет уменьшить интенсивность осадкообразования и одновременно снизить расход концентрата без опасности осадкообразования. Благодаря использованию нанофильтрационных мембран можно уменьшить дозу ингибитора и сократить эксплуатационные затраты. Цель исследования — изучение эффективности разработанной технологии, определение эксплуатационных затрат и экологического эффекта.

Материалы и методы. Проведены экспериментальные исследования по обработке подземных вод и эффективности предложенной технологии. Установлены скорости образования осадков в каждом аппарате схемы, составы очищенной воды в зависимости от величины коэффициента снижения объема K (отношения расхода исходной воды к расходу концентрата) в установке.

Результаты. Получены основные зависимости, позволяющие определить требуемое количество мембранных аппаратов, расходы реагентов и затраты электроэнергии для выявления эксплуатационных затрат. Для случая состава воды одного из водозаборов на территории Московской области приведен пример технологического расчета установки, определения оптимальных типов мембран, доз реагентов и величины выхода фильтрата. Представлены расчеты, демонстрирующие сокращение эксплуатационных затрат мембранной установки при замене обратноосмотических мембран на нанофильтрационные за счет снижения расходов сбрасываемого концентрата на 90–95 %, а также затрат на реагенты и электроэнергию.

Выводы. Показано, что при замене обратноосмотических мембран на нанофильтрационные в существующей установке ее производительность может быть увеличена на 40–50 %, при этом качество очищенной воды остается на уровне требований СанПиН. Расход концентрата может быть сокращен в 10–20 раз. Нанофильтрационные мембраны для снижения жесткости и аммония при малых значениях давления и за счет большей производительности, посредством меньшей селективности дают возможность добиться снижения скорости осадкообразования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обратный осмос, нанофильтрация, ингибиторы осадкообразования, осадкообразование на мембранах, сокращение расхода концентратов, снижение жесткости, удаление аммония, снижение фтора

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Первов А.Г., Спицов Д.В. Модернизация установок обратного осмоса, используемых для питьевого водоснабжения, с целью сокращения эксплуатационных затрат // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 5. С. 628–645. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.628-645

Автор, ответственный за переписку: Алексей Германович Первов, ale-pervov@yandex.ru.

Reducing operating costs through modernization of reverse osmosis facilities used to produce drinking water

Alexey G. Pervov, Dmitriy V. Spitsov

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

ABSTRACT

Introduction. The authors address problems of operation of reverse osmosis facilities, used to treat ground water and produce drinking water; they also focus on operating cost reduction strategies. Nanofiltration membranes may reduce operating costs, concentrate consumption, and sedimentation. A smaller antiscalant dosage can also reduce the cost of chemicals. The purpose of this research is to evaluate the ecological and economic efficiency of the new technique.

Materials and methods. The authors conducted groundwater treatment experiments to reduce groundwater hardness and ammonia content. Scaling rates and the composition of water, produced by each membrane module, were determined in each membrane module depending on coefficient K values.

Results. The relationships, identified in the course of experiments, enabled the authors to calculate the number of membranes required to reach the designed efficiency value. The design of a membrane facility, tailored to a certain groundwater

composition, is presented; membrane models and treatment efficiency values are identified. The use of nanofiltration membranes reduces the operating costs by 40 percent due to the lower consumption of antiscalants, power, and concentrate.

Conclusions. The research has proven that the replacement of reverse osmosis membranes by nanofiltration membranes at the water treatment facilities in operation ensures a 40–50 percent increase in their production capacity. The water quality remains the same and meets the WHO standards. Also, the concentrate consumption rate goes down 10–20-fold. The authors have also found out that the use of nanofiltration membranes reduces the water hardness and ammonia content at lower pressure values and scaling rates, although the safe operation and higher efficiency are in place. The proposed modernization strategy reduces operating costs by 40–50 percent through membrane replacement without any changes in the membrane design.

KEYWORDS: reverse osmosis, nanofiltration, antiscalants, sedimentation on membranes, concentrate flow rate reduction, hardness reduction, ammonia removal, fluorine removal

FOR CITATION: Pervov A.G., Spitsov D.V. Reducing operating costs through modernization of reverse osmosis facilities used to produce drinking water. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):628-645. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.628-645 (rus.).

Corresponding author: Alexey G. Pervov, ale-pervov@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно для очистки подземных вод в Подмосковье использовались главным образом станции обезжелезивания, основанные на процессах аэрации с последующим фильтрованием [1, 2]. Но ряд скважин дает воду с повышенным содержанием не только железа, но и ионов жесткости. Применение реагентных или ионообменных методов умягчения воды требует высоких эксплуатационных затрат на реагенты [3–5]. Кроме того, системы ионообменного умягчения (натрий-катионирования) имеют высокоминерализованные стоки, что создает проблему их сброса [3]. Помимо привычных встречающихся в подземных водах Подмосковья железа и ионов жесткости, на ряде подземных водозаборов отмечаются повышенные содержания фторид-ионов, ионов аммония, нитрат-ионов, стронция, лития, мышьяка и даже бора [4]. С появлением и расширением использования метода обратного осмоса для опреснения воды, подготовки воды в промышленных целях, стала очевидна эффективность его для улучшения качества подземных вод, применяемых для целей питьевого водоснабжения [6, 7]. Метод обратного осмоса позволяет «универсально» задерживать из воды любые загрязнения в ионной форме: фториды, стронций, литий, аммоний. Поэтому за последние 10 лет установки обратного осмоса используются для обработки воды из скважин с высоким содержанием жесткости, стронция, фтора и других загрязнений, а также с повышенной минерализацией (величиной общего солевого содержания выше 1000 мг/л) [3]. Опыт эксплуатации первых установок обратного осмоса в Московской области выявил две ключевые проблемы: большие затраты на сервисные реагенты (для предотвращения осадкообразования карбоната кальция) и на сброс концентратов в систему городской канализации [4, 5].

Сегодня для получения качественной питьевой воды на объектах водоканалов используется схема с применением мембран обратного осмоса, что и является причиной всех проблем, связанных с высокими значениями эксплуатационных расхо-

дов и расходов концентратов. Обычно поставщики установок обратного осмоса в качестве предочистки используют обезжелезивание по «классической» схеме (с аэрацией и фильтрованием), после которой вода поступает на установку обратного осмоса, где разделяется на фильтрат и концентрат. При очистке подмосковной подземной воды с величиной общего солевого содержания 600–800 мг/л и общей жесткости 8–2 мг-экв/л с помощью мембран обратного осмоса получается пермеат с величиной общего солевого содержания 15–20 мг/л и жесткости 0,05–0,1 мг/л. Если смешать пермеат с исходной водой, прошедшей обезжелезивание в соотношении 1:1, то получается вода с величиной общего солевого содержания примерно 300–500 мг/л и значением общей жесткости 5–7 мг-экв/л.

Именно по этому принципу проектируются и работают системы обратного осмоса для очистки подземных вод для целей питьевого водоснабжения [1, 6, 7]. В исходной подземной воде часто наблюдаются превышения по мутности, железу, жесткости, литию, стронцию и фторидам.

В данной работе в качестве примера рассмотрена модернизация станции водоподготовки, установленной на водозаборном узле (ВЗУ) «Ботаково» в Троицком районе Московской области. Общая производительность станции по очищенной воде составляет 135 м³/ч. Работа станции производится с подмесом исходной воды в фильтрат обратного осмоса в соотношении 35 м³/ч обезжелезенной исходной воды на 100 м³/ч пермеата установки обратного осмоса. Установка обратного осмоса предназначена для снижения содержания жесткости и аммония. Расход концентрата составляет 25–28 %.

В зависимости от концентраций содержащихся в воде других загрязнений (фторидов, ионов аммония и др.) и эффективностей их задержания обратноосмотическими мембранами может изменяться соотношение потоков исходной обезжелезенной воды и фильтрата установки обратного осмоса при их смешивании.

Проблему создает опасность образования на мембранах кристаллических осадков карбоната

кальция и быстрая потеря мембранами величины их начальной производительности при обработке вод с высоким содержанием ионов кальция. В связи с высоким содержанием ионов кальция значение величины «выхода фильтрата» установок при обработке подземных вод (отношение расхода фильтрата к расходу обрабатываемой воды) не превышает 0,65–0,75. Увеличение выхода фильтрата ведет к повышению пересыщения по карбонату кальция в концентрате и скорости осадкообразования [7]. Необходимой составной частью технологии является дозирование ингибиторов в исходную воду для предотвращения осадкообразования [8, 9]. Но полного предотвращения, как показывает опыт проведенных исследований [10, 11], не удастся добиться ни с каким видом ингибитора [12, 13]. Как показано в результате исследований и опыта эксплуатации [12, 14], наиболее эффективно и рационально применять наночистотные мембраны, которые специально были разработаны для целей питьевого водоснабжения [15, 16]. Результаты экспериментальных работ свидетельствуют о том, что даже при высоких значениях выхода фильтрата с использованием наночистотных мембран удастся получить воду питьевого качества [10, 12]. Применение наночистотных мембран позволяет сократить расходы на предотвращение осадкообразования и увеличить значения выхода фильтрата установок [14, 15], что дает возможность существенно сократить эксплуатационные затраты и повысить надежность работы мембранных установок в системах питьевого водоснабжения [17, 18].

В настоящем исследовании нами предполагается продемонстрировать преимущество наночистотных мембран с целью очистки подземных вод для питьевого водоснабжения. Авторами разработана схема обработки подземных вод с помощью наночистотных мембран, позволяющая радикально сократить расходы концентрата [16, 17]. Отличительной чертой разработанной технологии сокращения расхода концентрата служит применение второй ступени обработки концентрата, использующей наночистотные мембраны с низкой величиной селективности. Благодаря низкому значению селективности мембран на второй ступени процессы осадкообразования в мембранах второй ступени идут замедленно [4, 17]. При этом пермеат мембранных аппаратов второй ступени, имеющий низкое качество и по своему составу приближающийся к составу исходной воды, направляется на вход в установку.

Наночистотные мембраны работают при давлении 1,0 МПа, что дает существенное снижение величины затрат на электроэнергию по сравнению с мембранами обратного осмоса, эксплуатация которых производится при давлении 1,6 МПа. Наночистотные мембраны дают возможность значительно снизить интенсивность осадко-

образования на мембранах и благодаря этому сократить расходы на ингибитор и моющие растворы. Доза ингибитора в случае использования наночистотных мембран составляет 1 г/м³, а частота проведения химических промывок снижена в 3 раза по сравнению с применением обратноосмотических мембран. При наночистотных мембранах обработке на мембранной установке подлежит больший объем воды, но затраты на замену мембран при этом оказываются ниже затрат на электроэнергию и реагенты. Дополнительная экономия получается за счет сокращения расходов на сброс концентрата в горканализацию.

Единственный путь снижения эксплуатационных затрат — замена обратноосмотических мембран на наночистотные. Наночистотные мембраны обладают большей «стойкостью» к осадкообразованию — скорости осадкообразования в наночистотных аппаратах в несколько раз ниже, чем в аппаратах с мембранами обратного осмоса при одинаковых составах обрабатываемой воды. Это позволяет эксплуатировать установки при сниженных дозах ингибиторов, с большей продолжительностью фильтроцикла и при сокращенных расходах концентрата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель экспериментов — обоснование возможности получения воды высокого качества и снижения эксплуатационных затрат при замене обратноосмотических мембран на наночистотные с низкой величиной селективности. Испытания осуществлялись с помощью серийных мембранных элементов типа 4040 моделей производства фирмы CSM (Корея). Эксперименты проводились на воде водозабора «Ботаково». Использовались промышленные серийные мембранные аппараты стандарта 4040 с обратноосмотическими мембранами BLN (селективностью по солям 95–96 %) и наночистотными мембранами моделей 90 NE и 70 NE (селективностью соответственно 90 и 70 %) производства компании CSM (Корея). В процессе экспериментов устанавливались составы очищенной воды в каждом аппарате схемы, а также скорости осадкообразования в каждом аппарате схемы (рис. 1). При выполнении экспериментов по выявлению скоростей роста на мембранах отложений карбоната кальция в исходную воду добавлялся самый распространенный в отечественной практике ингибитор роста отложений «Аминат-К», производимый НПО «Траверс» (г. Москва). Рекомендуемая доза ингибитора — 5 мг/л.

Концентрации ионов кальция и магния определялись трилонометрически. Концентрации ионов жесткости, хлорид-ионов, а также щелочность устанавливались титриметрическим методом. Концентрации сульфат-ионов выявлялись с применением турбидиметрического метода анализа. С помощью

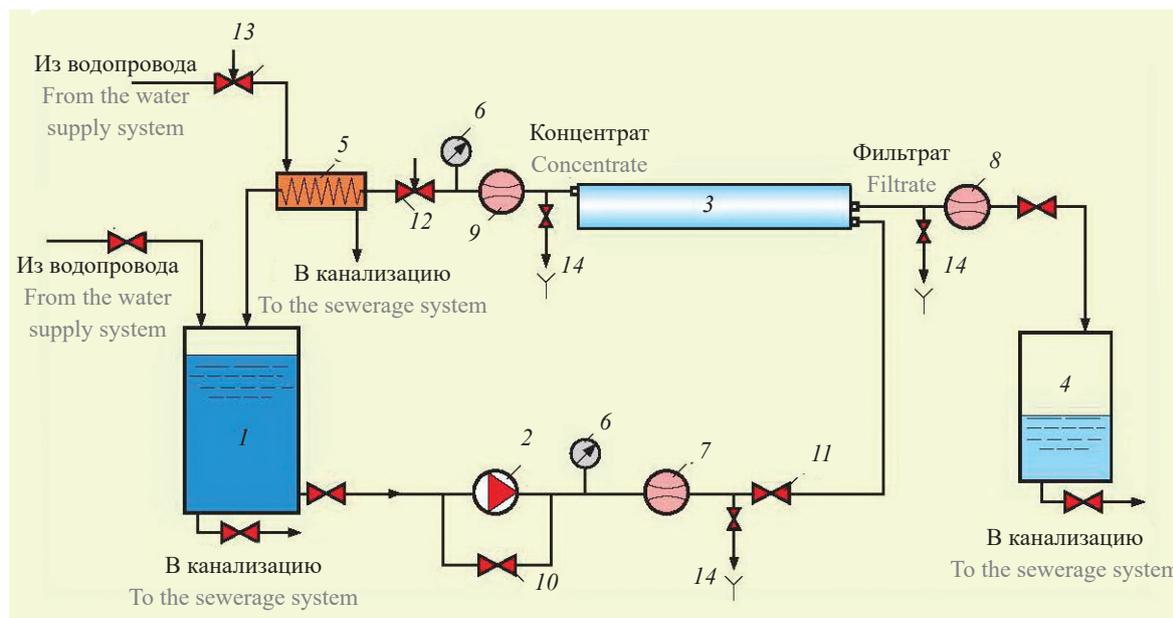


Рис. 1. Схема экспериментальной установки обработки подземной воды с нанофильтрационными и обратноосмотическими мембранами: 1 — бак исходной воды; 2 — рабочий насос; 3 — рулонный мембранный элемент в корпусе; 4 — бак сбора пермеата; 5 — теплообменник; 6 — манометр; 7 — водосчетчик исходной воды; 8 — водосчетчик пермеата; 9 — водосчетчик концентрата; 10 — регулирующий вентиль на байпасе насоса; 11 — регулирующий вентиль на линии исходной воды; 12 — регулирующий вентиль на линии концентрата; 13 — регулирующий вентиль на линии охлаждающей воды; 14 — пробоотборники

Fig. 1. The flow diagram of a test unit that has reverse osmosis and nanofiltration membranes: 1 — feed water tank; 2 — main pump; 3 — spiral wound membrane module in the pressure vessel; 4 — permeate tank; 5 — heat exchanger; 6 — pressure gauge; 7 — feed water flow meter; 8 — permeate flow meter; 9 — concentrate flow meter; 10 — bypass flow valve; 11 — feed water flow valve; 12 — concentrate flow valve; 13 — cooling water valve; 14 — samplers

фотометрического метода с использованием фотоэлектрического фотометра КФК определялись концентрации ионов аммония. Ионы натрия устанавливались атомно-адсорбционным методом, а сухой остаток — весовым методом анализа. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Исходная вода в количестве 50 л помещалась в бак исходной воды 1, откуда насосом 2 подавалась в мембранный аппарат 3. В мембранном аппарате вода разделялась на фильтрат (пермеат) и концентрат. Концентрат возвращался обратно в бак 1, а пермеат (очищенная вода) собирался в баке сбора фильтрата 4. По мере накопления очищенной воды в баке 4, объем исходной воды в баке 1 постоянно уменьшался, а значения концентраций растворенных в исходной воде солей постоянно увеличивались. Из баков 1 и 4 регулярно отбирались пробы воды для определения в них концентраций кальция, аммония и других ионов при различных значениях объемов исходной воды в баке 1: 40, 30, 20, 10 л. Отношение объема исходной воды, поступающего в установку $V_{\text{и}}$ в баке 1 в процессе работы установки называется коэффициентом снижения объема исходной воды K . Величина K связана с важной характеристикой мембранных установок — величиной выхода фильтрата — отношением расхода фильтрата $V_{\text{ф}}$ к расходу исходной воды $V_{\text{и}}$ соотношением:

$K = 1/(1 - V_{\text{ф}}/V_{\text{и}})$. В табл. 1 представлен состав исходной подземной воды и результаты определения концентраций кальция, аммония, лития, стронция в пермеатах различных аппаратов при значениях $K = 1,2$.

На рис. 2 и 3 показаны результаты установления концентраций ионов кальция и аммония в концентрате и в пермеате установок с мембранами обратного осмоса, нанофильтрации с различными характеристиками. На рис. 2 приведены графики полученных зависимостей значений концентраций кальция в концентрате и пермеате от значения коэффициента снижения объема K .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение скоростей роста осадка карбоната кальция в аппаратах с различными мембранами производилось в соответствии с разработанной авторами методикой [12] и состоит в построении экспериментальных зависимостей изменения концентраций кальция в концентрате в зависимости от значения K (рис. 2), количества осадка от величины коэффициента K и времени эксперимента. На рис. 4 представлены результаты выявления скоростей образования карбоната кальция в аппаратах с различными мембранами. Поскольку селективность нанофильтрационных мембран по ионам кальция

Табл. 1. Результаты определения состава исходной подземной воды и концентраций основных загрязнений в пермеатах различных мембранных аппаратов

Table 1. The chemical composition of groundwater and concentrations of principal contaminants in permeates produced by different membrane modules

Номер Number	Показатели Indicators	Исходная вода Feed water	Пермеат BLN BLN permeate	Пермеат 90 NE 90 NE permeate	Пермеат 70 NE 70 NE permeate
1	Ca ²⁺ , мг/л / mg/l	70	0,5	4,6	10,8
2	Mg ²⁺ , мг/л / mg/l	15	0,1	1,0	2,4
3	HCO ₃ ⁻ , мг/л / mg/l	366	9,5	26,5	85
4	SO ₄ ²⁻ , мг/л / mg/l	34	1,2	2,3	5,4
5	Cl ⁻ , мг/л / mg/l	56	2,2	6,0	12,1
6	Sr ²⁺ , мг/л / mg/l	3,0	0,07	0,2	0,6
7	Li ⁺ , мг/л / mg/l	0,03	0,003	0,007	0,016
8	F ⁻ , мг/л / mg/l	1,6	0,03	0,14	0,53
9	NH ₄ ⁺ , мг/л / mg/l	7,4	0,02	0,5	1,25
10	pH	7,5	6,0	6,7	7,0
11	Общее солесодержание, мг/л Total salt content, mg/l	527	20,3	52,0	164,0
12	Рабочее давление, бар Operation pressure, bar	12,5	12,5	12,5	12,5
13	Расход пермеата, л/ч Permeate consumption rate, l/h	—	48,9	71,8	100,4

Концентрация иона кальция, мг-экв/л
Calcium ion concentration, mg-equ/l

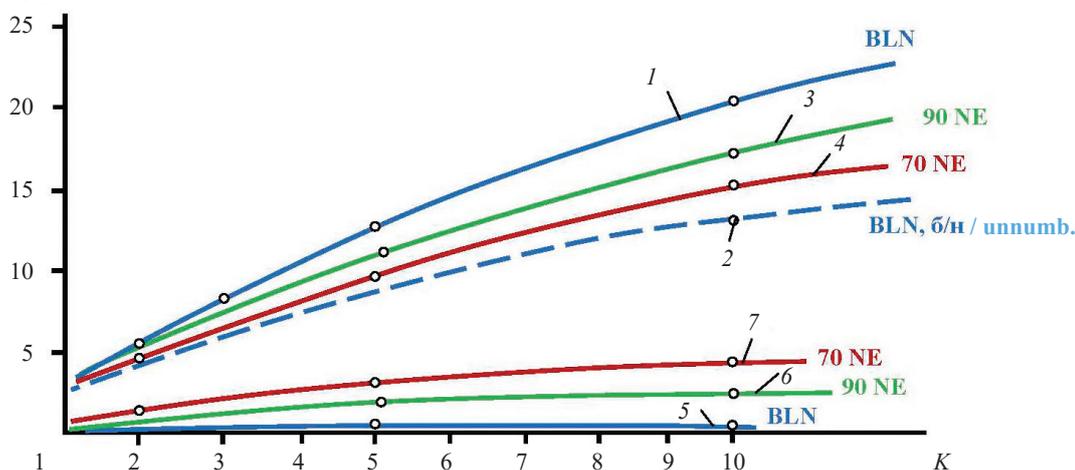


Рис. 2. Зависимости концентраций кальций-ионов в исходной воде и пермеате различных мембранных аппаратов от величины коэффициента снижения объема *K*: 1 — концентрат, обратноосмотические мембраны BLN с дозированием в исходную воду ингибитора «Аминат-К»; 2 — концентрат, обратноосмотические мембраны BLN, без дозирования ингибитора; 3 — концентрат, нанофильтрационные мембраны 90 NE; 4 — концентрат, нанофильтрационные мембраны 70 NE; 5 — пермеат, обратноосмотические мембраны BLN с дозированием ингибитора «Аминат-К» в исходную воду; 6 — пермеат, нанофильтрационные мембраны 90 NE; 7 — пермеат, нанофильтрационные мембраны 70 NE

Fig. 2. Dependencies of calcium ion concentration values in feed water and permeates of different membrane modules on feed water reduction coefficient *K*: 1 — concentrate, reverse osmosis BLN membranes, Aminat-K antiscalant added into the feed water; 2 — concentrate, reverse osmosis membranes BLN, no antiscalant added; 3 — concentrate, nanofiltration membranes 90 NE; 4 — concentrate, nanofiltration membranes 70 NE; 5 — permeate, reverse osmosis membrane BLN, Aminat-K antiscalant added into the feed water; 6 — permeate, nanofiltration membranes 90 NE; 7 — permeate, nanofiltration membranes 70 NE

ниже, чем у нанофильтрационных мембран, количество накапливаемых на нанофильтрационных мембранах в процессе эксперимента оказывается значительно меньше, чем на обратноосмотических мембранах [12]. Поэтому при обработке подземной воды с высоким содержанием ионов жесткости благодаря применению нанофильтрационных мембран можно снизить интенсивность образования осадка карбоната кальция в мембранных аппаратах и значительно увеличить значение коэффициента снижения объема исходной воды K (рис. 4).

В проведенных авторами многочисленных исследованиях [12–16] были сделаны выводы, что наиболее эффективной технологией для очистки подземных вод Подмосковья является технология нанофильтрации, основанная на применении нанофильтрационных мембран — мембран обратного осмоса с пониженной селективностью. Требуемый состав очищенной воды достигается путем низких значений селективности нанофильтрационных мембран по ряду загрязнений, а снижение эксплуатационных затрат — за счет сокращения расходов реагентов (ингибиторов и моющих растворов) благодаря меньшей скорости образования осадков малорастворимых солей на нанофильтрационных мембранах, чем на мембранах обратно-

го осмоса (рис. 4, 5). Более того, применение нанофильтрационных мембран позволяет снизить затраты на электроэнергию [18, 19]. На основании полученных экспериментальных данных авторами был сделан прогноз снижения производительности мембранной установки (рис. 6) для случаев использования различных типов мембран при очистке воды заданного состава (табл. 1) и использовании ингибитора «Аминат-К» для предотвращения образования на мембранах карбонатных отложений [15, 16]. Результаты прогноза снижения производительности установки выполнены по программе, описанной в работе [15].

На рис. 7 показана схема подключения аппаратов обратного осмоса в установке на объекте ВЗУ «Ботаково» производительностью 130 м³/ч с указанием количества мембранных элементов (126) и мембранных корпусов (на 7 мест) и количества мембранных ступеней, а также изменение величины K (коэффициента снижения объема исходной воды) при движении исходной воды по корпусам установки. В табл. 2 представлены показатели состава очищенной воды (пермеата каждого мембранного элемента) в зависимости от величины K на выходе из каждого элемента по ходу движения воды по корпусам установки.

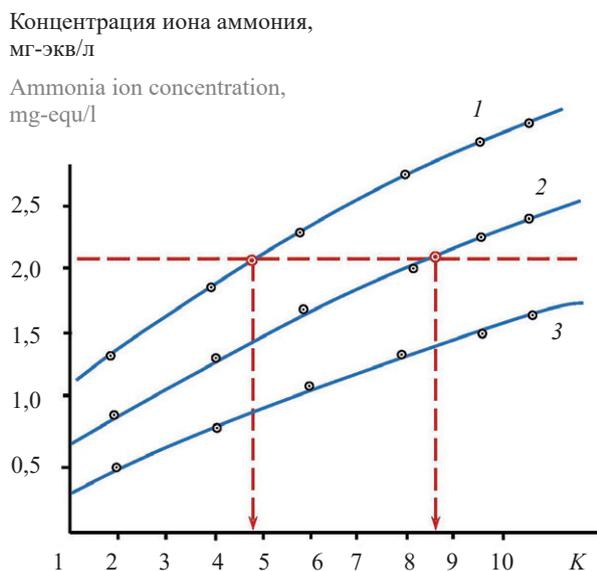


Рис. 3. Зависимости концентраций ионов аммония в пермеате различных мембранных аппаратов от величины коэффициента снижения объема K : 1 — обратноосмотические мембраны BLN; 2 — нанофильтрационные мембраны 90 NE; 3 — нанофильтрационные мембраны 70 NE

Fig. 3. Dependencies of ammonia ion concentrations in permeate on coefficient K values for various membrane modules: 1 — reverse osmosis membranes BLN; 2 — nanofiltration membranes 90 NE; 3 — nanofiltration membranes 70 NE

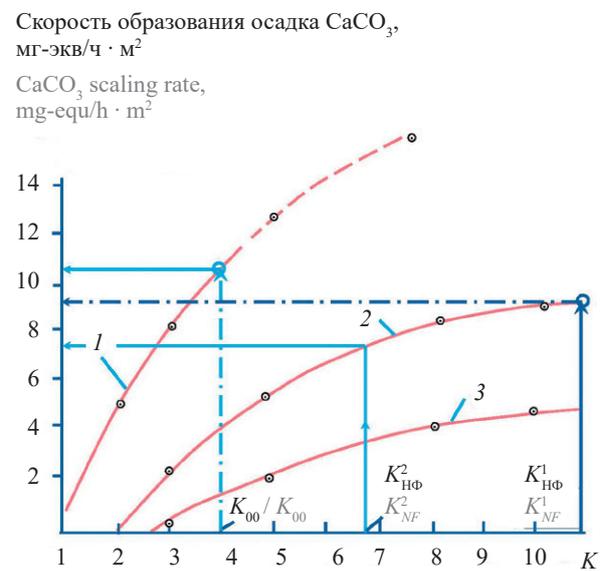
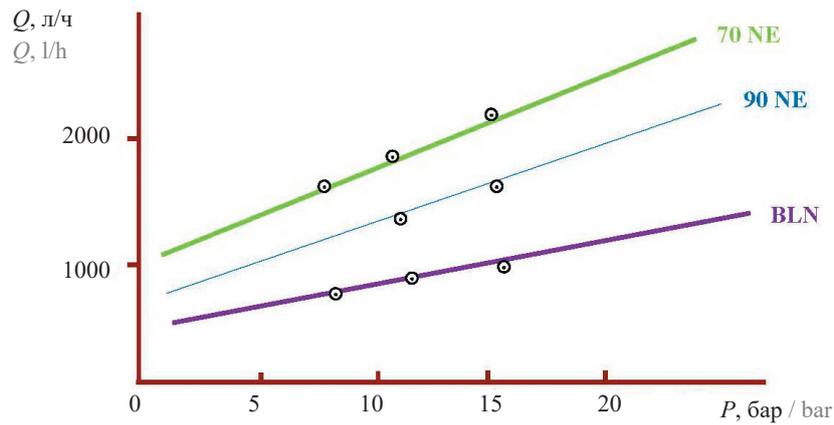
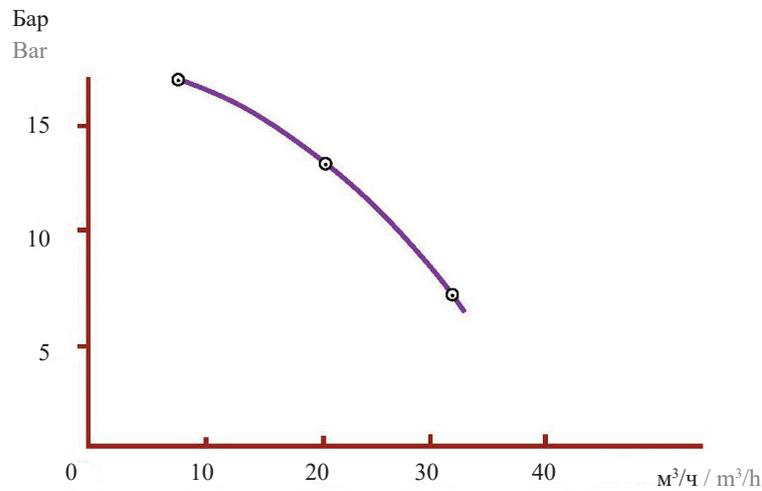


Рис. 4. Результаты определения скоростей образования осадка карбоната кальция в аппаратах с различными типами мембран в зависимости от значения коэффициента K : 1 — обратноосмотические мембраны BLN; 2 — нанофильтрационные мембраны 90 NE; 3 — нанофильтрационные мембраны 70 NE

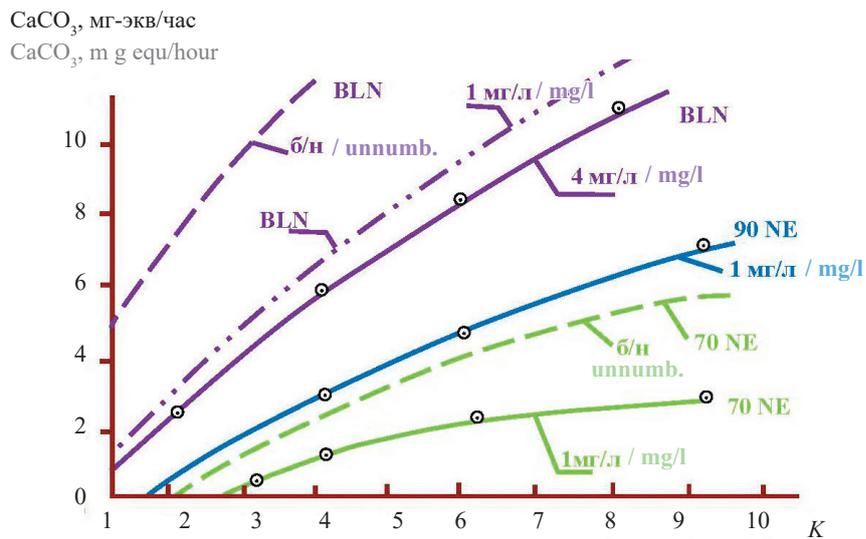
Fig. 4. Scaling rates in membrane modules having different membranes, presented as dependencies of scaling rate values on K values: 1 — reverse osmosis BLN membranes; 2 — nanofiltration 90 NE membranes; 3 — nanofiltration 70 NE membranes



a



b



c

Рис. 5. Преимущества применения нанофильтрационных мембран перед обратноосмотическими в установках получения питьевой воды: зависимость производительности мембранных аппаратов от давления (a); $Q-H$ характеристика насоса (b); скорости осадкообразования в зависимости от кратности концентрирования (c)

Fig. 5. Advantages of nanofiltration membranes over reverse osmosis membranes in drinking water production facilities: dependency of capacity on pressure (a); $Q-H$ characteristics of pump (b); dependency of scaling rates on coefficient K value (c)

Табл. 2. Изменение показателей состава очищенной воды с применением различных мембран в аппаратах установки (рис. 5, 6)
Table 2. Changes in the treated water composition for different membranes (Fig. 5, 6)

Номер ступени Stage number	Номер аппарата Unit number	Мембраны 90 NE, давление 14,5 бар Membranes 90 NE, pressure 14,5 bar							Мембраны 70 NE, давление 13,5 бар Membranes 70 NE, pressure 13,5 bar						
		$Q_{\text{ф}}, \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{р}}, \text{ м}^3/\text{ч}$	K	Ca ²⁺ , мг/л / mg/l	NH ₄ ⁺ , мг/л / mg/l	F ⁻ , мг/л / mg/l	Si ²⁺ , мг/л / mg/l	Li ⁺ , мг/л / mg/l	$Q_{\text{ф}}, \text{ м}^3/\text{ч}$ $Q_{\text{р}}, \text{ м}^3/\text{ч}$	K	Ca ²⁺ , мг/л / mg/l	NH ₄ ⁺ , мг/л / mg/l	F ⁻ , мг/л / mg/l	Si ²⁺ , мг/л / mg/l	Li ⁺ , мг/л / mg/l
I	1	1,4	1,1	0,4	0,6	0,23	0,2	0,002	1,9	1,25	0,8	1,2	0,4	0,55	0,01
	2	1,3	1,12	0,45	0,63	0,24	—	0,0022	1,8	1,3	0,85	1,22	0,43	—	0,011
	3	1,2	1,15	0,5	0,65	0,25	0,22	0,024	1,8	1,8	0,9	1,27	0,46	—	0,011
	4	1,2	1,2	0,6	0,7	0,27	—	0,027	1,7	2,0	1,0	1,3	0,48	—	0,012
	5	1,1	1,5	0,7	0,75	0,3	0,24	0,003	1,7	2,2	1,1	1,4	0,5	0,6	0,013
	6	1,1	2,0	1,1	0,8	0,36	0,27	0,004	1,6	2,5	1,4	1,55	0,55	0,7	0,014
	7	1,0	2,1	1,0	1,0	0,4	0,3	0,005	1,6	3,0	1,7	1,7	0,6	0,75	0,016
II	1	1,0	2,3	1,2	1,1	0,48	0,33	0,0055	1,5	3,8	2,0	1,8	0,65	0,78	0,016
	2	0,9	2,5	1,4	1,1	0,51	0,34	0,006	1,5	4,2	2,5	1,9	0,7	0,8	0,017
	3	0,8	4,1	1,6	1,2	0,55	0,35	0,0064	1,4	5,1	2,8	2,0*	0,8	0,81	0,018
	4	0,8	5,0	1,8	1,4	0,6	0,36	0,007	1,3	6,0	3,0	2,2*	0,9	0,82	0,019
	5	0,7	5,5	2,0	1,6	0,65	0,37	0,008	1,3	6,8	3,6	2,4	0,93	0,87	0,02
	6	0,7	6,1	2,1	1,7	0,71	0,38	0,009	1,2	8,0	4,1	2,6*	0,95	0,9	0,022*
	7	0,6	7,5	2,3	1,8	0,8	0,4	0,01	1,0	10,0	4,5	3,0*	1,0	0,93	0,025*

Примечание: * — превышает нормативные значения.

Note: * — exceeds standard values.

Очищенная
вода
потребителю
100 м³/ч
Treated water
designated for
a consumer,
100 m³/h

Возврат
пермеата
на вход
в установку
21 м³/ч
Permeate
returned to
the unit, 21 m³/h

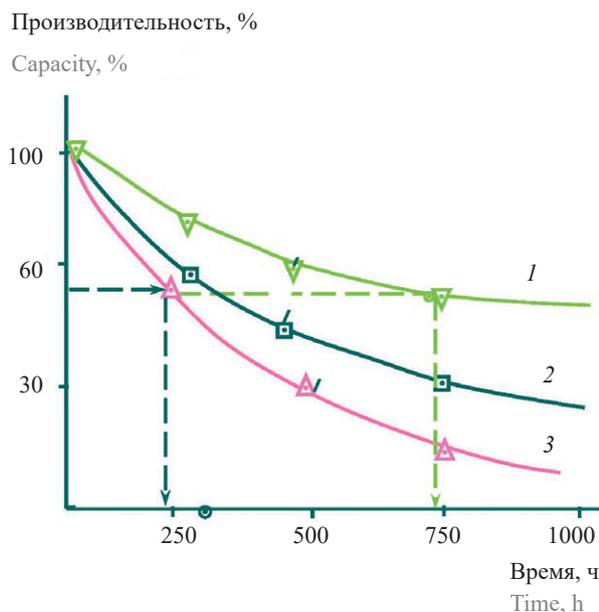


Рис. 6. Прогноз снижения производительности мембранной установки с течением времени: 1 — нанофильтрационные мембраны 70 NE; 2 — нанофильтрационные мембраны 90 NE; 3 — обратные осмотические мембраны BLN

Fig. 6. Projected capacity loss by a membrane facility over time: 1 — nanofiltration membranes 70 NE; 2 — nanofiltration membranes 90 NE; 3 — reverse osmosis membranes BLN

На рис. 8–10 показаны балансовые схемы установки производительностью 65 м³/ч с указанием количества мембранных аппаратов и напорных корпусов, а также с приведением расходов исходной воды, пермеата, концентрата и подмеса, баланса концентраций (на примере иона аммония) для случаев: существующей схемы с применением обратноосмотических мембран типа BLN (рис. 8); модернизации установки с применением нанофильтрационных мембран 90 NE (рис. 8); применения нанофильтрационных мембран 70 NE. Благодаря применению нанофильтрационных мембран при той же схеме установки и при том же насосном агрегате и количестве мембранных аппаратов типа 8040 в установке сокращается расход концентрата [20, 21], убирается «подмес», увеличивается расход пермеата до требуемого значения, а качество очищенной воды (пермеата) соответствует требованиям СанПиН (рис. 3, табл. 1, 2). Более того, расход ингибитора при использовании нанофильтрации может быть снижен в 4 раза (до дозы величиной 1 мг/л) и, соответственно, время между проведением промывок так же может быть увеличено в 2–3 раза благодаря меньшей интенсивности осадкообразования на нанофильтрационных мембранах (рис. 4).

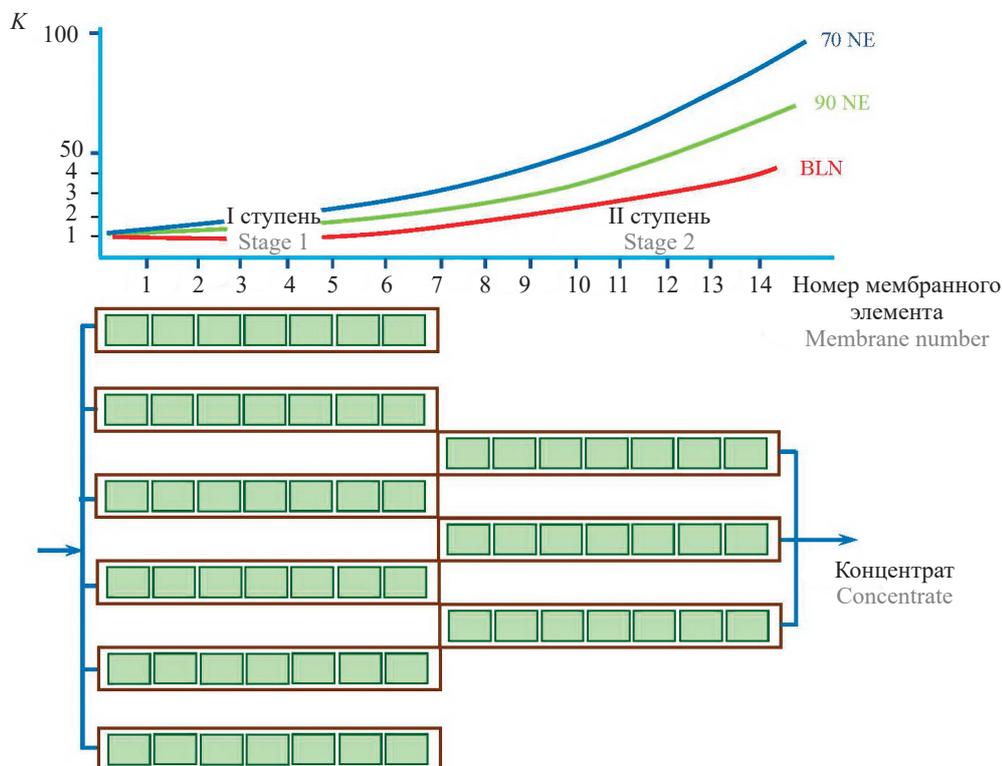


Рис. 7. Схема подключения аппаратов в установке производительностью 65 м³/ч и изменения значений коэффициента K на выходе из мембранных аппаратов в процессе движения воды по корпусам установки для случаев применения обратноосмотических и нанофильтрационных мембран с различными характеристиками

Fig. 7. Connection diagram of membrane modules in a membrane facility having the capacity of 65 m³/h and changes in the coefficient K value at the outlet of membrane modules in the course of the water flow through pressure vessels for cases when different reverse osmosis and nanofiltration membranes are used

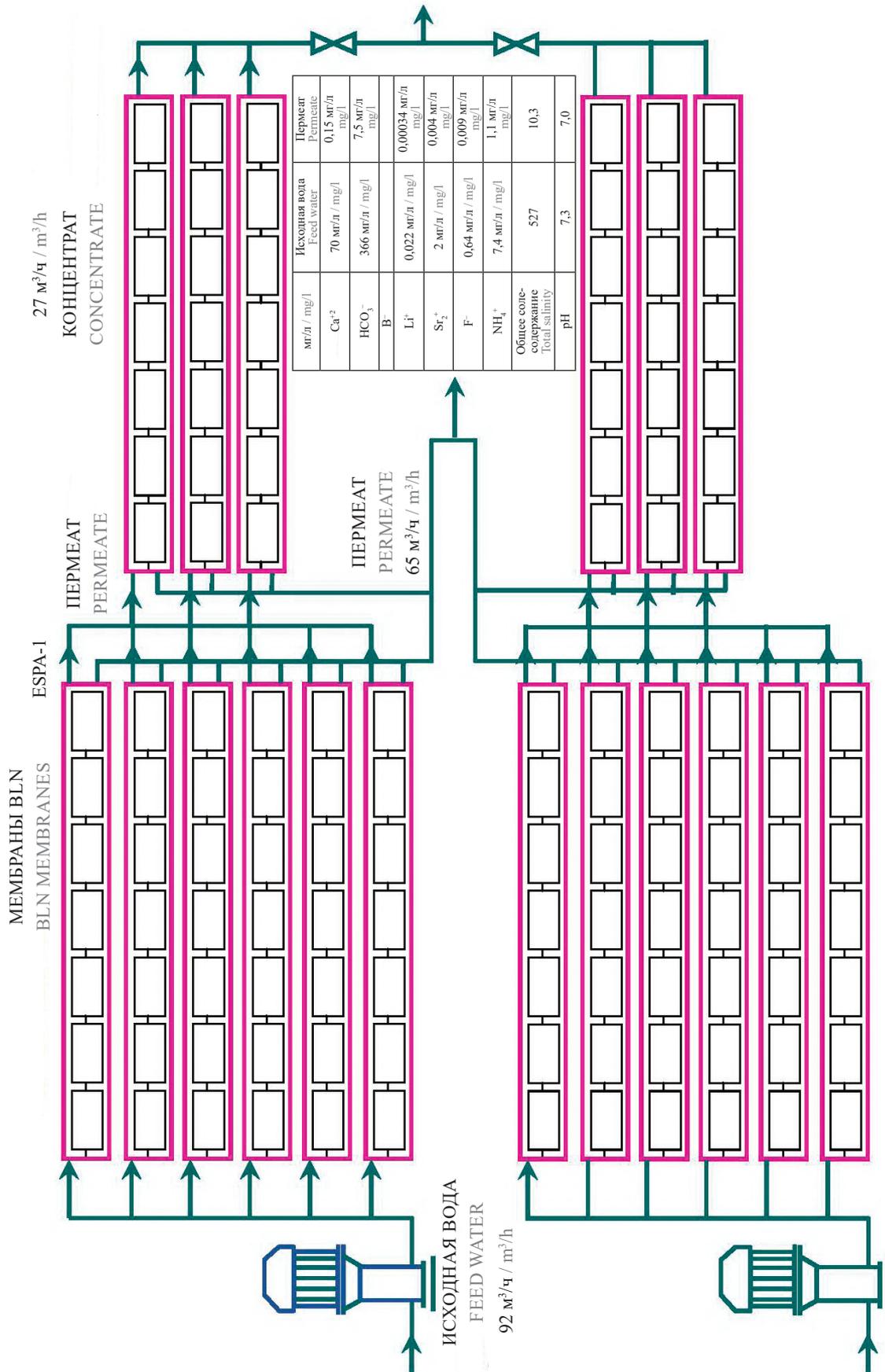


Рис. 8. Балансовая схема установки производительностью 130 м³/ч на ВЗУ «Богатово» с мембранами BLN

Fig. 8. The balance flow diagram of the water treatment facility having the capacity of 130 m³/h. The facility is installed at Botakovo groundwater intake plant that has BLN reverse osmosis membranes

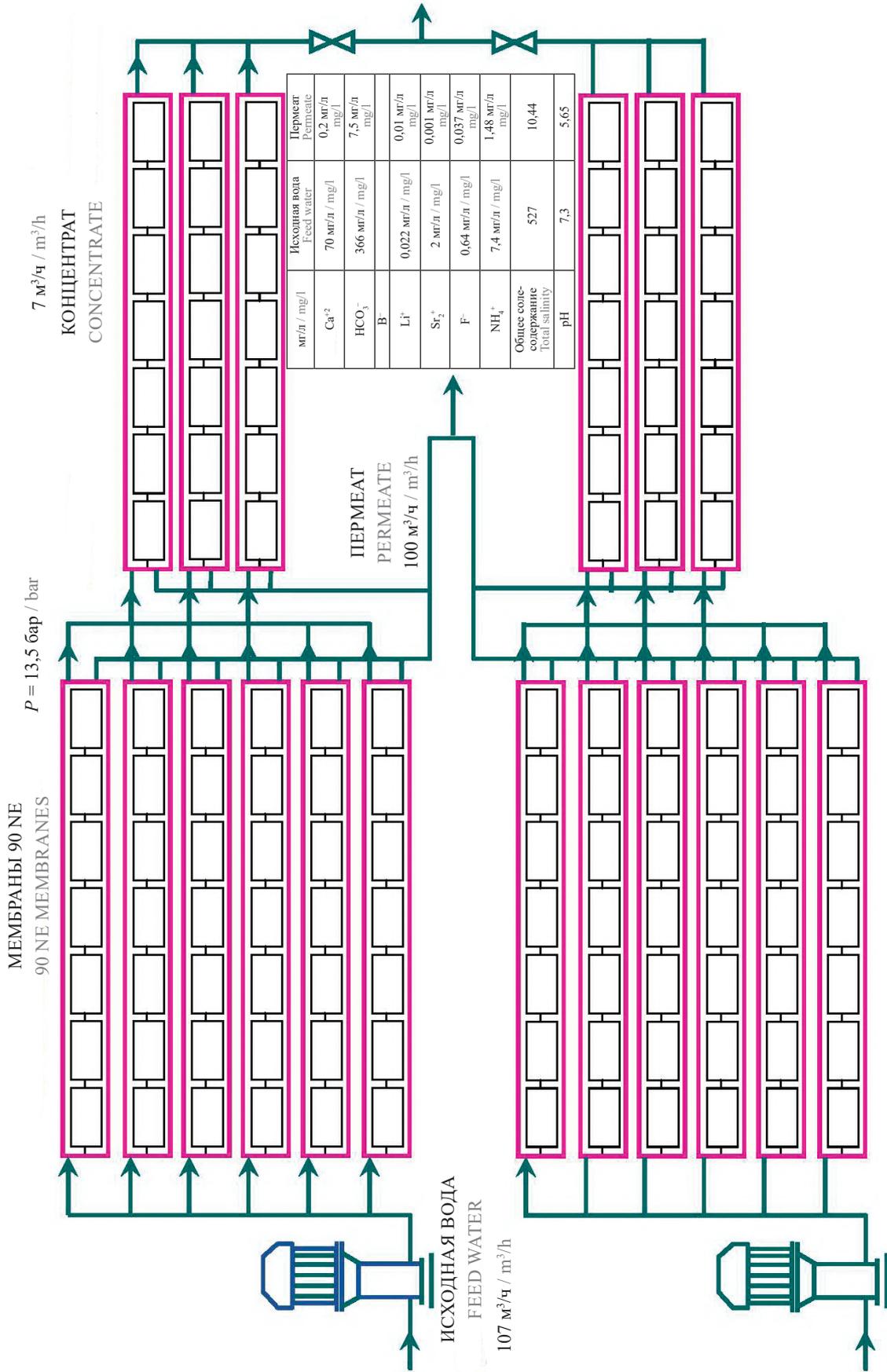


Рис. 9. Балансовая схема установки производительностью 170 м³/ч на ВЗУ «Богатово» с мембранами 90 NE

Fig. 9. The balance flow diagram of the water treatment facility having the capacity of 170 m³/h. The facility is installed at Botakovo groundwater intake plant that has 90 NE membranes

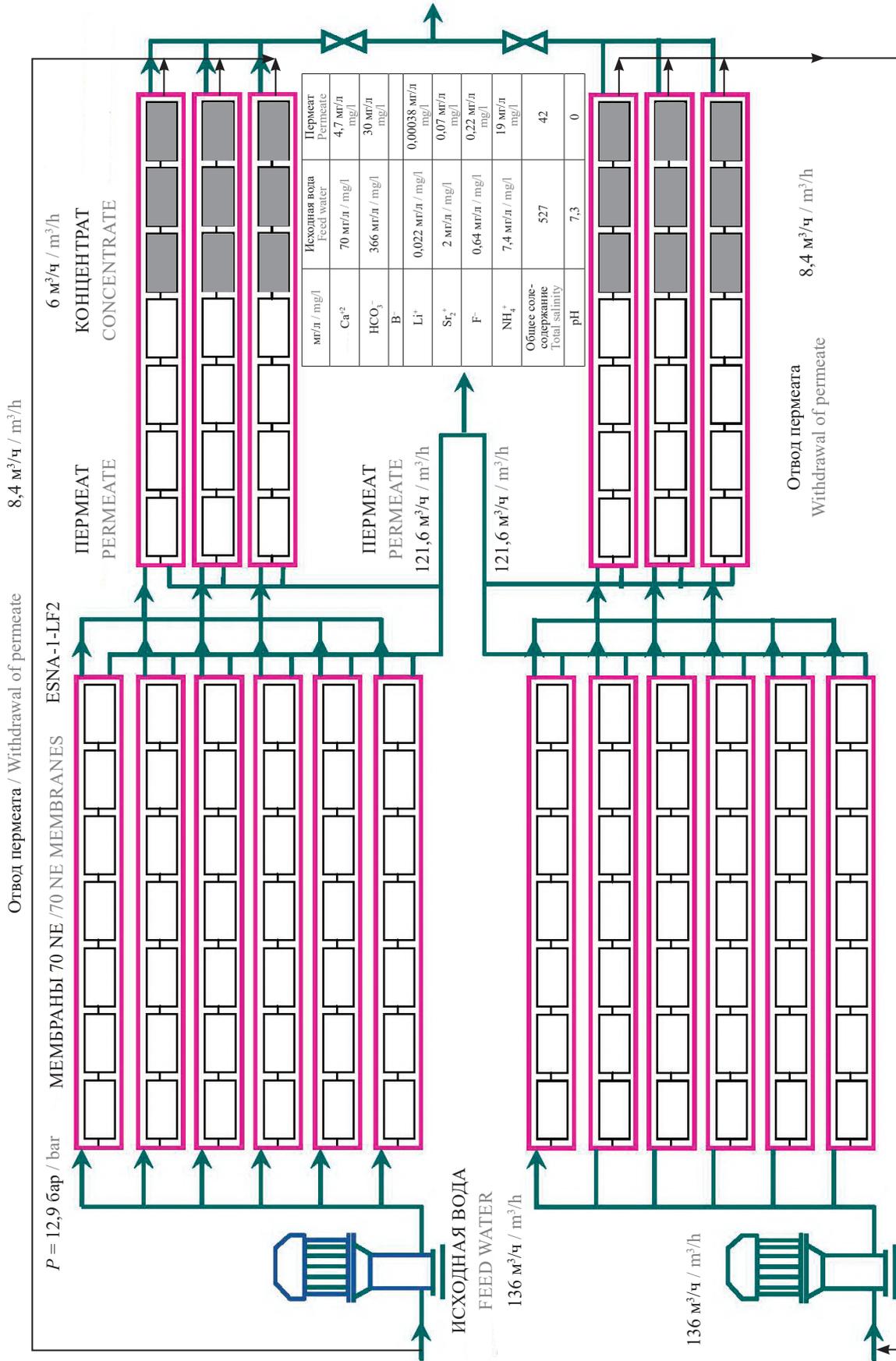


Рис. 10. Балансовая схема установки ВЗУ «Ботаково» с мембранами 70 NE

Fig. 10. The balance flow diagram of the water treatment facility installed at Botakovo groundwater intake plant that has 70 NE membranes

На рис. 8 представлены результаты расчета установки ВЗУ «Ботаково» с применением обратно-осмотических мембран типа BLN производительностью 130 м³/ч (126 мембранных элементов типа 8040), величиной выхода пермеата 70 %, величиной рабочего давления 13–14 бар, т.е. со всеми параметрами установки, работающей на объекте. На рис. 9 показаны результаты расчетов, выполненных для случая замены мембран на модель 90 NE, при этом величина выхода пермеата выбрана на уровне 90 %. При рекомендуемом давлении 12 бар расход насосов на каждом блоке установки будет составлять 72 м³/ч, т.е. при замене мембран можно использовать существующие насосы (рис. 5). На рис. 10 приведены результаты расчета установки для случая замены обратно-осмотических мембран на мембраны модели 70 NE с самой низкой величиной селективности. При этом, как продемонстрировано на рис. 10, производительность мембран вырастает до величины 100 м³/ч на один мембранный блок, а величина выхода пермеата достигает 93 %. Однако, как видно из рис. 3 и табл. 2, качество очищенной воды по показателям концентраций аммония превышает допустимые нормативы. Для достижения требуемого качества следует «отсечь» хвостовые мембранные элементы (три последних в корпусах, как показано на рис. 10) и пермеат от этих элементов направить на вход в установку, смешав его с исходной водой. В табл. 2 показаны результаты расчетов производительности каждой из мембран по пермеату и качество пермеата каждого мембранного аппарата, на основании которого определено количество «отсекаемых» хвостовых аппаратов.

На рис. 11 показана $Q-H$ характеристика насоса, использованного на установке ВЗУ «Остафьево». Как видно, с изменением напора со 160 до 120 м его подача увеличивается на 30–35 %.

Определение величин рабочего давления нанофильтрационных мембран, количества аппаратов для снижения расхода концентрата («хвостовых» аппаратов) производится на основании расчетов. Подбор расходов исходной воды, пермеата и концентрата при переходе на использование нанофильтрационных мембран и рабочего давления насоса осуществляется на основе его $Q-H$ характеристики, как показано на рис. 12.

Для случая, если установка претерпела «модернизацию» в соответствии с разработанными и предлагаемыми рекомендациями по замене мем-

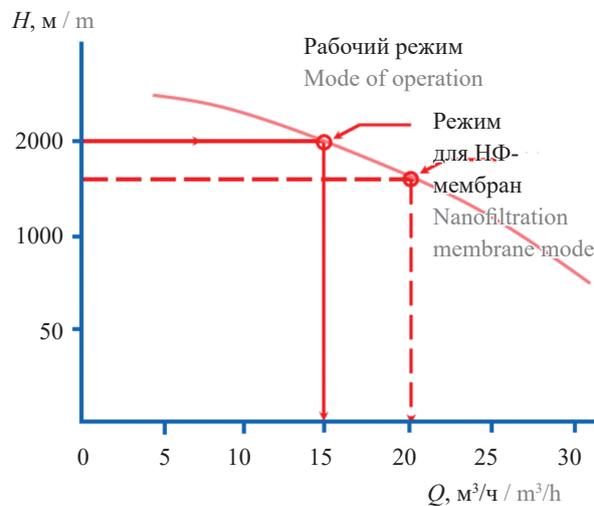


Рис. 11. Определение подачи насоса, исходя из его $Q-H$ характеристики

Fig. 11. Pump capacity depending on its $Q-H$ characteristics

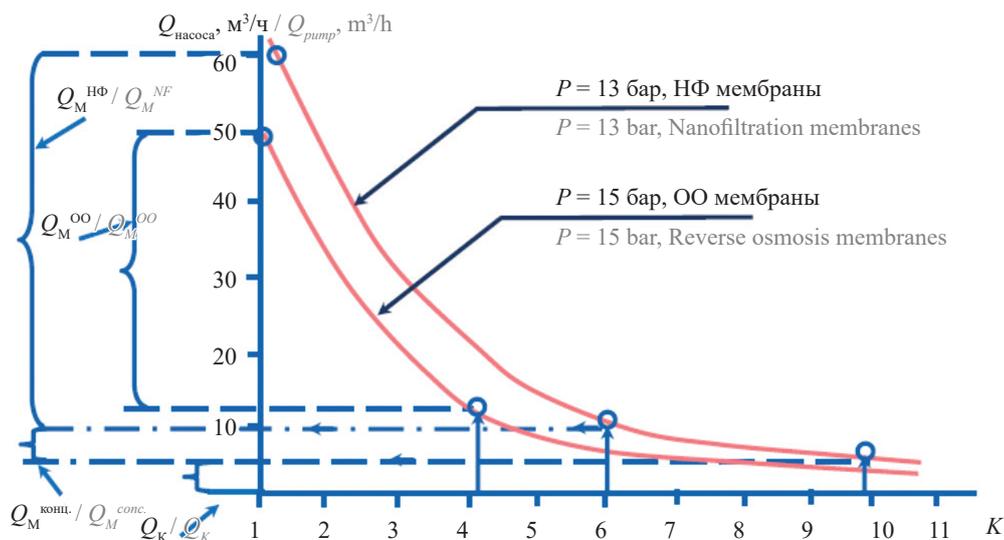


Рис. 12. График для определения расходов пермеатов ОО и НФ мембран Q_f , расходов концентрата Q_k , а также «байпасного» расхода пермеата, подаваемого на вход в установку Q_u

Fig. 12. The graph used to determine permeate flow rate Q_f for reverse osmosis and nanofiltration membranes, concentrate flow rate Q_k and “bypass” permeate flow rate Q_u if the permeate is fed to the unit inlet

бран, благодаря чему снижается расход ингибитора, делаются реже промывки и уменьшается расход моющих реагентов, сокращается расход электроэнергии, увеличивается общее количество полу-

чаемой воды. Результаты определения эксплуатационных затрат, себестоимости очищенной воды и величины экономического эффекта представлены в табл. 3.

Табл. 3. Результаты определения состава исходной подземной воды и концентраций основных загрязнений в пермеатах различных мембранных аппаратов

Table 3. The chemical composition of groundwater and concentrations of principal contaminants in permeates produced by different membrane modules

Параметры эксплуатации Operating parameters	Существующая технология Current technology	Рекомендуемая технология Recommended technology
Расход исходной воды, м ³ /ч Feed water consumption rate, m ³ /h	180	224
Расход пермеата: Permeate consumption rate:		
м ³ /ч / m ³ /h	130	214
м ³ /мес. / m ³ /month	39 000	60 000
м ³ /год / m ³ /year	468 000	720 000
Расход концентрата, м ³ /ч Concentrate consumption rate, m ³ /h	50	10
Расход подмеса, м ³ /ч Admixture consumption rate, m ³ /h	64	–
Рабочее давление, МПа Operating pressure, MPa	1,3–1,4	1,1–1,15
Годовые энергозатраты, кВт Annual electric power consumption, kWt	456 000	456 000
Затраты на электроэнергию, руб. Electricity cost, RR	2 280 000	2 280 000
Мембранные элементы, модель Membrane models	Hydranautics ESPA-2	Hydranautics ESPA-2
Годовые затраты на замену мембран, руб. Annual membrane replacement costs, RR	1 008 000	1 108 800
Ингибитор: тип/доза Antiscalant, type/dose	Эктоскейл/4 Ectoscale/4	Аминат/1 Aminat/1
Годовой расход ингибитора, кг Annual antiscalant consumption rate, kg	2592	648
Стоимость ингибитора, руб./т Antiscalant cost, RR	100 000	200 000
Годовые затраты на ингибитор, руб. Annual antiscalant expenses, RR	260 000	130 000
Количество промывок в год Number of flushings per year	16	6
Расходы реагентов на одну промывку, кг: Reactants consumed per flushing, kg:		
NaOH (50 %)	60	–
HCl (50 %)	60	–
лимонная кислота / citric acid	–	250
Годовые расходы реагентов, кг: Annual consumption of reactants, kg:		
NaOH	720	–
HCl	720	–
лимонная кислота / citric acid	–	1 500

Окончание Табл. 3 / End of the Table 3

Параметры эксплуатации Operating parameters	Существующая технология Current technology	Рекомендуемая технология Recommended technology
Стоимости реагентов для промывки, руб./т: Const of flushing reactants, RR/ton:		
NaOH	80 000	–
HCl	60 000	–
лимонная кислота / citric acid	–	100 000
Годовые затраты, кг, на: Annual costs of:		
NaOH	57 600	–
HCl	43 200	–
лимонная кислота / citric acid	–	150 000
Сумма годовых эксплуатационных затрат, руб. Total annual operating expenses, RR	2 732 000	1 794 800
Себестоимость очистки, руб./м ³ Cost of cleansing, RR/m ³	2 732 000/468 000 = 5,84	1 794 800/720 000 = 2,49
Себестоимость с учетом смешения, руб./м ³ Cost, including mixing, RR/m ³	2 732 000/698 400 = 3,91	–

ВЫВОДЫ

Рассмотрены пути повышения эксплуатационных параметров работы установок обратного осмоса. Наиболее эффективным путем является замена обратноосмотических мембран на нанофильтрационные. Применение нанофильтрационных мембран для очистки подземных вод в целях питьевого водоснабжения позволяет уменьшить интенсивность осадкообразования и одновре-

менно снизить расход концентрата без опасности осадкообразования.

Производительность установки может быть увеличена на 40–50 %, при этом качество очищенной воды остается на уровне требований СанПиН. Расход концентрата может быть сокращен в 4–6 раз.

Также благодаря использованию нанофильтрационных мембран можно снизить дозу ингибитора до значения 1 мг/л и соответственно снизить величину эксплуатационных затрат на 40 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Suratt W.B., Adrews D.R., Pujals V.J., Richards S.A. Design considerations for major membrane treatment facility for groundwater // *Desalination*. 2000. Vol. 131. Issue 1–3. Pp. 37–46. DOI: 10.1016/S0011-9164(00)90004-3
2. Salman M.A., Al-Nuwaibit G., Safar M., Al-Mesri A. Performance of physical treatment method and different commercial antiscalants to control scaling deposition in desalination plant // *Desalination*. 2015. Vol. 356. Pp. 294–313. DOI: 10.1016/j.desal.2015.04.023
3. Turek M., Mitko K., Dydo P., Laskovska E., Jakobic-Kolon A. Prospects for high water recovery membrane desalination // *Desalination*. 2017. Vol. 401. Pp. 180–189. DOI: 10.1016/j.desal.2016.07.047
4. Френкель В.С., Первов А.Г., Андрианов А.П., Головесов В.А. Investigation of antiscalant dosing influence on scaling process in reverse osmosis facilities and membrane surface adsorption // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 6. С. 722–733. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.722-733
5. Jamaly S., Darwish N.N., Ahmed I., Hasan S.W. A short review on reverse osmosis pretreatment technologies // *Desalination*. 2014. Vol. 354. Pp. 30–38. DOI: 10.1016/j.desal.2014.09.017
6. Goh P.S., Lau W.J., Othman M.H.D., Ismail A.F. Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies // *Desalination*. 2018. Vol. 425. Pp. 130–155. DOI: 10.1016/j.desal.2017.10.018
7. Jiang S., Li Y., Ladewig B.P. A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies // *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 595. Pp. 567–583. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.235
8. Li X., Hasson D., Shemer H. Flow conditions affecting the induction period of CaSO₄ scaling on RO membranes // *Desalination*. 2018. Vol. 431. Pp. 119–125. DOI: 10.1016/j.desal.2017.08.014
9. Zimmer K., Hater W., Icart A., Jaworski J., Kruse N., Braun G. The performance of polycarboxylates as inhibitors for CaCO₃ scaling in reverse osmosis plants // *Desalination and Water Treatment*.

2016. Vol. 57. Issue 48–49. Pp. 23162–23175. DOI: 10.1080/19443994.2015.1133874

10. *Shahid M.K., Choi Y.-G.* The comparative study for scale inhibition on surface of RO membranes in wastewater reclamation: CO₂ purging versus three different antiscalants // *Journal of Membrane Science*. 2018. Vol. 546. Pp. 61–69. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.09.087

11. *Li C., Guo X., Wang X., Fan S., Zhou Q., Shao H. et al.* Membrane fouling mitigation by coupling applied electric field in membrane system: Configuration, mechanism and performance // *Electrochimica Acta*. 2018. Vol. 287. Pp. 124–134. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.06.150

12. *Pervov A., Andrianov A., Rudakova G., Popov K.* A comparative study of some novel “green” and traditional antiscalants efficiency for the reverse osmotic Black Sea water desalination // *Desalination and Water Treatment*. 2017. Vol. 73. Pp. 11–21. DOI: 10.5004/dwt.2017.20363

13. *Oshchepkov M., Kamagurov S., Tkachenko S., Ryabova A., Popov K.* Insight into the mechanisms of scale inhibition: a case study of a task-specific fluorescent-tagged scale inhibitor location on gypsum crystals // *ChemNanoMat*. 2019. Vol. 5. Issue 5. Pp. 586–592. DOI: 10.1002/CNMA.201800660

14. *Первов А.Г., Рудакова Г.Я., Ефремов Р.В.* Разработка программ для технологического расчета систем обратного осмоса и нанофильтрации с использованием реагентов «Аминат» // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2009. № 7. С. 21–28.

15. *Головесов В.А., Первов А.Г., Сухов Г.Д., Рудакова Г.Я.* Влияние выбора антискаланта на величину эксплуатационных затрат для установок обратного осмоса // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 5.

С. 1163–1174. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1163-1174

16. *Первов А.Г., Андрианов А.П., Головесов В.А., Данилычева М.Н.* Изучение механизма образования кристаллических отложений в мембранных аппаратах и роли ингибиторов для предотвращения этого процесса // *Мембраны и мембранные технологии*. 2019. Т. 9. № 6. С. 430–444. DOI: 10.1134/s2218117219060038

17. *Первов А.Г., Андрианов А.П., Ефремов Р.В., Головесов В.А.* Новая технология сокращения расхода концентрата установок обратного осмоса // *Мембраны и мембранные технологии*. 2021. Т. 11. № 3. С. 202–210. DOI: 10.1134/S221811722103007X

18. *Al-Qadami E., Ahsan A., Mustafa Z., Abdurashheed A.S., Yusof K.W., Shah S.M.H.* Nanofiltration membrane technology and its applications in surface water treatment: A review // *Journal of Desalination and Water Purification*. 2020. Vol. 18. Pp. 3–9.

19. *Guo H., Li X., Yang W., Yao Z., Mei Y., Peng L.E. et al.* Nanofiltration for drinking water treatment: a review // *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2022. Vol. 16. Issue 5. Pp. 681–698. DOI: 10.1007/s11705-021-2103-5

20. *Mohammad A.W., Hilal N., Al-Zoubi H., Darwish N.A.* Prediction of permeate fluxes and rejections of highly concentrated salts in nanofiltration membranes // *Journal of Membrane Science*. 2007. Vol. 289. Issue 1–2. Pp. 40–50. DOI: 10.1016/j.memsci.2006.11.035

21. *Tian J., Zhao X., Gao S., Wang X., Zhang R.* Progress in research and application of Nanofiltration (NF) technology for brackish water treatment // *Membranes*. 2021. Vol. 11. Issue 9. P. 662. DOI: 10.3390/membranes11090662

Поступила в редакцию 24 января 2022 г.

Принята в доработанном виде 23 марта 2022 г.

Одобрена для публикации 23 марта 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: **Алексей Германович Первов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 168126, Scopus: 6603768203, ResearcherID: R-8851-2016, ORCID: 0000-0002-7518-2342; ale-pervov@yandex.ru;

Дмитрий Владимирович Спицов — кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения; исполняющий обязанности директора института Инженерно-экологического строительства и механизации; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 531559, ResearcherID: AAG-2158-2020, ORCID: 0000-0001-6252-9485; spitsovdv@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Первов А.Г. — научное руководство, концепция исследования, написание исходного текста.

Спицов Д.В. — развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Suratt W.B., Adrews D.R., Pujals V.J., Richards S.A. Design considerations for major membrane treatment facility for groundwater. *Desalination*. 2000; 131(1-3):37-46. DOI: 10.1016/S0011-9164(00)90004-3
2. Salman M.A., Al-Nuwaibit G., Safar M., Al-Mesri A. Performance of physical treatment method and different commercial antiscalants to control scaling deposition in desalination plant. *Desalination*. 2015; 356:294-313. DOI: 10.1016/j.desal.2015.04.023
3. Turek M., Mitko K., Dydo P., Laskovska E., Jakobic-Kolon A. Prospects for high water recovery membrane desalination. *Desalination*. 2017; 401:180-189. DOI: 10.1016/j.desal.2016.07.047
4. Frenkel V.S., Pervov A.G., Andrianov A.P., Golovesov V.A. Investigation of antiscalant dosing influence on scaling process in reverse osmosis facilities and membrane surface adsorption. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14(6):722-733. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.722-733
5. Jamaly S., Darwish N.N., Ahmed I., Hasan S.W. A short review on reverse osmosis pretreatment technologies. *Desalination*. 2014; 354:30-38. DOI: 10.1016/j.desal.2014.09.017
6. Goh P.S., Lau W.J., Othman M.H.D., Ismail A.F. Membrane fouling in desalination and its mitigation strategies. *Desalination*. 2018; 425:130-155. DOI: 10.1016/j.desal.2017.10.018
7. Jiang S., Li Y., Ladewig B.P. A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies. *Science of The Total Environment*. 2017; 595:567-583. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.235
8. Li X., Hasson D., Shemer H. Flow conditions affecting the induction period of CaSO₄ scaling on RO membranes. *Desalination*. 2018; 431:119-125. DOI: 10.1016/j.desal.2017.08.014
9. Zimmer K., Hater W., Icart A., Jaworski J., Kruse N., Braun G. The performance of polycarboxylates as inhibitors for CaCO₃ scaling in reverse osmosis plants. *Desalination and Water Treatment*. 2016; 57(48-49):23162-23175. DOI: 10.1080/19443994.2015.1133874
10. Shahid M.K., Choi Y.-G. The comparative study for scale inhibition on surface of RO membranes in wastewater reclamation: CO₂ purging versus three different antiscalants. *Journal of Membrane Science*. 2018; 546:61-69. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.09.087
11. Li C., Guo X., Wang X., Fan S., Zhou Q., Shao H. et al. Membrane fouling mitigation by coupling applied electric field in membrane system: Configuration, mechanism and performance. *Electrochimica Acta*. 2018; 287:124-134. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.06.150
12. Pervov A., Andrianov A., Rudakova G., Popov K. A comparative study of some novel “green” and traditional antiscalants efficiency for the reverse osmotic Black Sea water desalination. *Desalination and Water Treatment*. 2017; 73:11-21. DOI: 10.5004/dwt.2017.20363
13. Oshchepkov M., Kamagurov S., Tkachenko S., Ryabova A., Popov K. Insight into the mechanisms of scale inhibition: A case study of a task-specific fluorescent-tagged scale inhibitor location on gypsum crystals. *ChemNanoMat*. 2019; 5(5):586-592. DOI: 10.1002/CNMA.201800660
14. Pervov A.G., Rudakova G.Ya., Efremov R.V. Development of computer software to design reverse osmosis and nanofiltration systems using antiscalant “Aminat”. *Water Supply and Sanitation Technique*. 2009; 7:21-28. (rus.).
15. Golovesov V.A., Pervov A.G., Suhov G.D., Rudakova G.Ya. Impact of chosen antiscalant on the operating costs value for reverse osmosis systems. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020; 15(8):1163-1174. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1163-1174 (rus.).
16. Pervov A.G., Andrianov A.P., Golovesov V.A., Danilycheva M.N. Investigation of scaling mechanism in membrane modules and influence of antiscalants on this process. *Membranes and Membrane Technologies*. 2019; 9(6):430-444. DOI: 10.1134/s2218117219060038 (rus.).
17. Pervov A.G., Andrianov A.P., Efremov R.V., Golovesov V.A. A new technique to reduce reverse osmosis concentrate discharge. *Membranes and Membrane Technologies*. 2021; 11(3):202-210. DOI: 10.1134/S221811722103007X (rus.).
18. Al-Qadami E., Ahsan A., Mustafa Z., Abdurashheed A.S., Yusof K.W., Shah S.M.H. Nanofiltration membrane technology and its applications in surface water treatment: A review. *Journal of Desalination and Water Purification*. 2020; 18:3-9.
19. Guo H., Li X., Yang W., Yao Z., Mei Y., Peng L.E. et al. Nanofiltration for drinking water treatment: a review. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2022; 16(5):681-698. DOI: 10.1007/s11705-021-2103-5
20. Mohammad A.W., Hilal N., Al-Zoubi H., Darwish N.A. Prediction of permeate fluxes and rejections of highly concentrated salts in nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science*. 2007; 289(1-2):40-50. DOI: 10.1016/j.memsci.2006.11.035
21. Tian J., Zhao X., Gao S., Wang X., Zhang R. Progress in research and application of Nanofiltration (NF) technology for brackish water treatment. *Membranes*. 2021; 11(9):662. DOI: 10.3390/membranes11090662

Received January 24, 2022.

Adopted in revised form on March 23, 2022.

Approved for publication on March 23, 2022.

B I O N O T E S: **Alexey G. Pervov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 168126; Scopus: 6603768203, ResearcherID: R-8851-2016, ORCID: 0000-0002-7518-2342; ale-pervov@yandex.ru;

Dmitriy V. Spitsov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Water Supply and Sanitation, Acting Director of the Institute for Environmental Engineering Construction and Mechanization; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 531559, ResearcherID: AAG-2158-2020, ORCID: 0000-0001-6252-9485; spitsovdv@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Alexey G. Pervov — conceptualization, data gathering and processing, writing of article, scientific editing of the text.

Dmitriy V. Spitsov — methodology, scientific editing of the text, supervision, conclusion.

The authors declare that there is no conflict of interests.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.646-654

Применение логистики регулирующих воздействий при реинжиниринге объектов транспортной инфраструктуры

Сергей Борисович Сборщик, Любовь Александровна Маслова

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие транспортной инфраструктуры возможно за счет реинжиниринга существующих одноименных объектов, а также в комплексе с возведением новых зданий и сооружений в преобразуемой полосе отвода. Цель исследования — научное обоснование воздействий в рамках программ реинжиниринга объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ). Мероприятиями реинжиниринга отдельных ОТИ принято считать реконструкцию, техническое перевооружение, реновацию, а относительно земельных участков в полосе отвода и смежных территорий — рекультивацию. Объект исследования — программы реинжиниринга, предмет изучения — ОТИ. Объект и предмет испытывают со стороны органа управления для достижения поставленных целей регулирующие воздействия, реципиентами которых являются участники программы реинжиниринга — собственники, подрядчики, пользователи.

Материалы и методы. Использованы теория логистики регулирующих воздействий и методологические положения имитационного моделирования. Для подтверждения целесообразности и обоснования возможности распределения ресурсов в рамках работ по объектам в процессе оперативного управления в исследовании приведена схема взаимодействия субъектов, участвующих в реализации программ реинжиниринга ОТИ.

Результаты. Результат исследования — формализованное описание определения выполнения программ реинжиниринга и формирования предложений по вновь начинаемым ОТИ.

Выводы. Установлено, что приведенные результаты могут стать основанием системы информационно-аналитического обеспечения реинжиниринга ОТИ, которая, помимо прочего, будет способствовать оптимальному потреблению материально-технических ресурсов и эффективному плану их поставок. В конечном счете, это должно привести к сокращению стоимости и продолжительности реинжиниринга ОТИ. Данное исследование может быть продолжено по следующим перспективным направлениям: реинжиниринг технологических процессов, реинжиниринг процессов управления, реинжиниринг организационных структур, реинжиниринг территорий и застройки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: транспортная инфраструктура, реинжиниринг, логистика, регулирующие воздействия, поток, развитие транспортного сообщения, транспортная доступность

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сборщик С.Б., Маслова Л.А. Применение логистики регулирующих воздействий при реинжиниринге объектов транспортной инфраструктуры // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 5. С. 646–654. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.646-654

Автор, ответственный за переписку: Любовь Александровна Маслова, MaslovaLA@mgsu.ru.

Application of logistics of regulatory impacts in the reengineering of transport infrastructure facilities

Sergey B. Sborshchikov, Lyubov A. Maslova

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

ABSTRACT

Introduction. The development of transport infrastructure may be ensured through the reengineering of existing facilities of the same name, and also in conjunction with the construction of new buildings and structures in the convertible right-of-way. The objective of the research is to provide a scientific basis for the impacts within the framework of reengineering programs for transportation infrastructure facilities. In accordance with the chosen research area, reconstruction, technical re-equipment, renovation are considered to be the reengineering measures of individual transportation infrastructure facilities, and reclamation is the one of land plots in the right-of-way and adjacent territories. The management body acts on the object and subject with Regulatory Impact to achieve the set goals, recipients of the impact are the reengineering program participants, i.e. owners, contractors, clients.

Materials and methods. The theory of Regulatory Impact Logistics and methodological provisions of simulation modelling are applied in the research. The research provides a diagram of the interaction of subjects, participating in the implementation of reengineering programs for transportation infrastructure facilities, to confirm the feasibility and substantiate the possibility of allocating resources between the works on facilities in the process of operational management.

Results. The result of the research is a formalized description of the determining the execution of reengineering programs and formation of proposals for newly launched transportation infrastructure facilities.

Conclusions. The results are established to form a possible basis for a system of information and analytical support for reengineering of transportation infrastructure facilities, this system, among other things, will contribute to the optimal consumption of material and technical resources and their effective supply schedule. Ultimately, this should lead to a reduction in the cost and duration of reengineering of transportation infrastructure facilities.

KEYWORDS: transportation infrastructure, reengineering, logistics, regulatory impacts, flow, development of transportation system, transport accessibility

FOR CITATION: Sborshchikov S.B., Maslova L.A. Application of logistics of regulatory impacts in the reengineering of transport infrastructure facilities. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):646-654. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.646-654 (rus.).

Corresponding author: Lyubov A. Maslova, MaslovaLA@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие транспортного сообщения, транспортной доступности неразрывно связано с обеспечением объектами соответствующей инфраструктуры требуемого количества и качества. В этой связи предполагается создание новых объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ), а также качественного преобразования уже существующих зданий и сооружений. Последнее направление деятельности попадает в предметную область реинжиниринга. Следует отметить, что к ней можно отнести и новое строительство, в том случае, если имеет место комплексное преобразование зданий и сооружений в полосе отвода дороги. Мероприятиями реинжиниринга отдельных ОТИ принято считать реконструкцию, техническое перевооружение, реновацию, а относительно земельных участков в полосе отвода и смежных территорий — рекультивацию [1–7].

Совокупность ОТИ, в отношении которых реализуются приведенные выше мероприятия, образуют программу реинжиниринга. Она в свою очередь испытывает со стороны субъекта управления для достижения поставленных целей регулирующие воздействия, реципиентами которых являются участники программы реинжиниринга (собственники, подрядчики, пользователи) [8–13]. Регулирующие воздействия характеризуются направленностью, интенсивностью, временем, объемом и образуют одноименные потоки. Управление потоками регулирующих воздействий может быть основано на методологии логистики [14–20].

В качестве гипотезы в основу исследования положено представленное в данной статье предположение, что эффективность качественного преобразования ОТИ напрямую связана с характером регулирования воздействий на мероприятия, проекты и программы реинжиниринга, следствием которых должно стать результативное и адекватное распределение ресурсов между ними.

Цель исследования — научное обоснование воздействий в рамках программ реинжиниринга ОТИ на основе логистики.

Данная цель определила необходимость решения следующих задач:

- 1) идентификация выполнения программы реинжиниринговых мероприятий;
- 2) формирование предложений по вновь начинаемым объектам реинжиниринга транспортной инфраструктуры.

Решение указанных задач предполагает использование теории логистики регулирующих воздействий и их формализованное описание — методологии имитационного моделирования.

Объектом исследования выбраны программы реинжиниринга, в качестве предмета изучения — объекты транспортной инфраструктуры.

Научная новизна проведенного исследования заключается в формализованном описании управления потоками регулирующих воздействий в рамках программы реинжиниринга ОТИ, которая связана с вариативностью включения организатора строительства в структуру реализации инвестиционно-строительной деятельности корпоративного уровня.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Переход к постиндустриальному развитию общества ознаменовал смену технологического уклада, что обусловило насущность качественного преобразования имеющихся бизнес-процессов и инженерных решений. Такая трансформация получила наименование «реинжиниринг», его теоретические и методологические основы заложили М. Хаммером и Дж. Чампи в своих трудах. В настоящем эта концепция распространена на технические решения во всех сферах деятельности. Изучение проблематики развития реинжиниринга в рассматриваемой предметной области освещено в публикациях авторов [1–8], а также находит подтверждение в трудах отечественных ученых, занимающихся исследованиями постиндустриального этапа развития

общества: Ф.И. Розанова [9], В.С. Концова [10], М.С. Томских [11], Е.В. Яковлевой [12], Ю.Г. Одегова, В.В. Павловой, Л.С. Теленной [13].

Опираясь на упомянутые научные публикации, в своем исследовании авторы предлагают в качестве конкретного инструментария управления трансформациями ОТИ, учитывающего современные тенденции общественного развития, логистику регулирующих воздействий. Формирование теоретического и методологического задела в данном научном направлении связано с исследованиями С.Б. Сборщикова [14, 15] и других авторов [16–20].

Логистика регулирующих воздействий охватывает весь спектр процессов в исследуемой предметной области: производственные, обеспечительные, подготовительные и вспомогательные. По причине высокой технологической детерминации реинжиниринговых мероприятий логистическая система будет иметь определенную конфигурацию, неразрывным элементом которой будет обратная связь.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Программы реинжиниринга ОТИ характеризуются большим разнообразием решаемых управленческих и технических задач по номенклатуре, объему, важности, сложности, что обуславливает широкий диапазон и динамику проявления рисков, снижение которых возможно при обособлении организатора строительства, что в свою очередь трансформирует сферы компетенции в управлении инвестиционно-строительным циклом и ведет к формированию инжиниринговой схемы управления. Таким образом, функции организатора строительства, как правило, выполняет инжиниринговая компания.

Моделирование управления программой реинжиниринга ОТИ связано с вариативностью имплементации организатора строительства в структуру реализации инвестиционно-строительной деятельности корпоративного уровня. В этой связи можно выделить три варианта:

- вариант 1 — инжиниринговая компания осуществляет свою деятельность в форме проектного офиса, а на уровне отдельного ОТИ действует традиционная генподрядная схема управления;
- вариант 2 — инжиниринговая компания управляет всеми работами на определенном ОТИ, участвуя как один из исполнителей в рамках проектного офиса, которым руководит профильное подразделение заказчика;
- вариант 3 — инжиниринговая компания руководит проектным офисом, а ее подразделения ретранслируют и уточняют управленческие сигналы на ОТИ, входящих в состав инвестиционной программы.

Наибольший интерес применительно к выбранной предметной области исследования представляют

две задачи, формализованное описание которых приводится далее.

1. Идентификация выполнения программы реинжиниринговых мероприятий.

Рассматриваемый ОТИ, входящий в состав программы реинжиниринга, может быть задан организационно-технологической моделью, которая имеет следующие особенности:

- каждое мероприятие реинжиниринга принадлежит к некоторой укрупненной группе работ (или так называемому технологическому этапу);
- выполнение мероприятий в рамках одного технологического этапа характеризуется определенной последовательностью (технологическим графом этапа Γ_k);
- укрупненные группы работ (технологические этапы) имеют установленные организационно-технологические связи (технологический граф Γ);
- мероприятия данного технологического этапа не могут начаться прежде, чем окончено выполнение мероприятий предыдущих технологических этапов.

Определим в качестве V_{ijk} объем мероприятия j -го вида, реализуемого на k -м технологическом этапе i -го объекта. Организационно-технологическая модель реинжиниринга ОТИ задается системой параметров $V = \{V_{ijk}\}$ совокупности технологических графов Γ, Γ_k , где i — номер объекта программы реинжиниринга $1 \leq i \leq N$; j — номер мероприятия $1 \leq j \leq M$; k — номер технологического этапа $1 \leq k \leq K$.

Идентификация выполнения программы реинжиниринга осуществляется в рамках интервала времени T^H, T^{OK} , где T^H, T^{OK} — соответственно начало и окончание периода планирования; t — текущий момент времени $t \in \{T^H, T^{OK}\}$. К началу рассматриваемого (текущего) периода известен фактически выполненный объем мероприятий реинжиниринга V_{ijk}^0 .

Рассматривая ход выполнения программы реинжиниринга относительно текущего периода, управленческие решения можно разделить на два типа:

- 1) решения, принятые до начала текущего периода и отраженные в календарном плане реализации реинжиниринговых мероприятий;
- 2) решения, принимаемые в процессе оперативного управления в ходе выполнения программы реинжиниринга.

При этом допускается, что решения первого типа достаточно обоснованы и приводят к заданным технико-экономическим показателям (ТЭП) в случае отсутствия отклонений хода реализации мероприятий реинжиниринга от установленного в календарном плане. В рамках решений второго типа целью оперативного управления является удержание выполнения программы реинжиниринга в границах минимальных отклонений от запланированных показателей.

Установим, как V_{ijk}^{Π} — планируемый на начало текущего периода объем j -го мероприятия реинжиниринга k -го технологического этапа на i -м объекте;

через $V_{ijk}(t)$ — объем мероприятия, фактически выполненного к моменту времени $t \in (T^H, T^{OK})$. Согласно установленному в календарном плане порядку, все мероприятия k -го технологического этапа на i -м здании должны начаться не ранее момента времени T_{ik}^H и окончиться не позднее T_{ik}^{OK} , при этом должны быть осуществлены мероприятия j -го вида в объеме V_{ijk}^{Π} . Фактические сроки начала и окончания соответствующего мероприятия обозначим через τ_{ijk}^H и τ_{ijk}^{OK} , а через R_{ijk} и ρ_{ijk} — соответственно планируемое и фактически используемое количество трудовых ресурсов на j -м мероприятии k -го технологического этапа на i -м ОТИ.

При описании управляющих решений второго типа стоит исходить из того, что принимаемые в отношении регулирования выполнения мероприятий реинжиниринга не могут быть полностью оптимальными из-за наличия следующих факторов:

- 1) отсутствие точных данных об условиях реализации мероприятий в будущем;
- 2) основанием решений является текущая информация;
- 3) ограниченность времени принятия оперативных решений.

Также необходимо отметить, что отсутствие обратной связи или задержки в ее функционировании приводят к тому, что при выработке решения используются косвенные методы оценки их эффективности. В подобной ситуации применяют метод минимизации отклонений фактического хода реализации мероприятий от запланированного на основе установления приоритетов ОТИ и обеспечения их необходимыми ресурсами в порядке их важности, срочности.

В связи с этим описание указанного принципа предпочтения заключается в ранжировании ОТИ программы реинжиниринга в определенный момент времени:

$$P(t) = (P_1(t), \dots, P_M(t)), \quad (1)$$

где $P_M(t)$ — перестановка элементов множества $(1, 2, \dots, N)$; N — число ОТИ.

Определим через $t_1, t_2 \dots$ моменты принятия решений (месяцы, декады, недели), в момент t_p вычисляются приоритеты объектов, в соответствии с которыми перераспределяются материально-технические и трудовые ресурсы.

Далее (формула (2)) рассматривается совокупность мероприятий, срок окончания которых — фактический τ_{ijk}^{OK} или плановый T_{ik}^{OK} — попадает в интервал (t_p, t_{p+1}) .

$$z_{ijk} = T_{ik}^{OK} - \tau_{ijk}^{OK}. \quad (2)$$

Если $z_{ijk} \geq 0$, то соответствующее мероприятие выполняется с опережением установленных сроков, если $z_{ijk} < 0$, то они отстают от плана. При этом сумма освободившихся трудоемкостей по ОТИ, реали-

зующих программу реинжиниринга с опережением, равна:

$$\sum_{z_{ijk} > 0} \rho_{ijk} (T_{ik}^{OK} - \tau_{ijk}^{OK}). \quad (3)$$

В другом случае, сумма трудозатрат, необходимых для реализации в плановый срок мероприятий по объектам, возводящимся с отставанием, будет:

$$\frac{V_{ijk}^{\Pi} - v_{ijk}(t_p)}{\alpha_{ij}}, \quad (4)$$

где $v_{ijk}(t_p)$ — объем мероприятий, фактически выполненный к моменту t_p :

$$v_{ijk}(t_p) = \alpha_{ij} \rho_{ijk} (t_p - \tau_{ijk}^H), \quad (5)$$

где α_{ij} — фактическая выработка ресурса на мероприятии j -го вида на i -м ОТИ.

Следует отметить два ограничения на планируемые и фактические объемы мероприятий реинжиниринга (формулы (6) и (7) соответственно):

$$\frac{V_{ijk}^{\Pi}}{A_j R_{ijk}} \leq T_{ik}^{OK} - T_{ik}^H, \quad (6)$$

$$V_{ijk}^{\Pi} = \alpha_{ij} \rho_{ijk} (\tau_{ijk}^{OK} - \tau_{ijk}^H), \quad (7)$$

где A_j — планируемая (нормативная) выработка j -го вида ресурса.

Таким образом, потребность в трудозатратах для отстающих объектов будет равна:

$$\sum_{z_{ijk} < 0} \rho_{ijk} (\tau_{ijk}^{OK} - t_p). \quad (8)$$

Распределение освободившихся ресурсов производится в соответствии с приоритетами $P(t_{p-1})$ объектов, для которых имеет место отставание от установленных календарным планом сроков, с учетом возможности использования соответствующего вида ресурса и ограничений на общее количество:

$$\sum_{ijk} \rho_{ijk} (t_p) = R_j. \quad (9)$$

Затем вычисляются новые $c_j t_p$ и (с учетом дополнительных ресурсов) окончания мероприятий реинжиниринга, при этом в случае полного удовлетворения потребностей какого-либо объекта новые сроки будут совпадать с установленными в календарном плане.

Для расчета приоритетов объектов в момент времени t_p все объекты упорядочиваются (формула (10)) по значению величины

$$S_i = \max_{(i, j)} \left[\frac{\tau_{ijk}^{OK} - T_{ik}^{OK}}{t_{p+1} - t_p} \right]. \quad (10)$$

Процедура расчета $\Pi(t_p)$ следующая:

- сравниваются значения S_i и S_{i+1} для всех i от 1 до $N = 1$;
- полагается, что

$$\Pi_i(t_{p+1}) = \Pi_{i+1}(t_p), \text{ если } S_{i+1} > S_i; \quad (11)$$

- сравнения и перестановки производятся до тех пор, пока не пересмотрены все пары индексов объектов из интервала $(1, N)$.

Выделение ресурсов на мероприятия реинжиниринга технологического этапа, начало которого находится в интервале времени (t_p, t_{p+1}) производится в соответствии с приоритетами и установленной в календарном плане продолжительностью технологического этапа:

$$\rho_{ijk} = \min \left(\frac{V_{ijk}^{\Pi}}{(T_{ik}^{\text{OK}} - T_{ik}^{\text{H}}) \alpha_{ij}}, \frac{R_i(t_p)(N - \Pi_i(t_p))}{N} \right). \quad (12)$$

Ограничения временного характера определяются тем, что для начала мероприятий каждого этапа должны быть в наличии соответствующие ресурсы (материальные, технологические, трудовые), а их отсутствие приводит к задержкам и простоям. В соответствии с этим обозначим через ξ_{ijk} — отклонение от графика поставки материально-технических ресурсов; η_{ijk} — отклонение от графика прихода трудовых ресурсов для выполнения j -го вида мероприятий, входящего в состав k -го технологического этапа на i -м ОТИ. Тогда срок начала j -го мероприятия реинжиниринга:

$$\tau_{ijk}^{\text{H}} = \max(T_{ik}^{\text{H}} + \xi_{ijk}, T_{ik}^{\text{H}} + \eta_{ijk}). \quad (13)$$

Окончание k -го технологического этапа должно удовлетворять ограничению:

$$\tau_{ik}^{\text{OK}} = \max_j \left(\tau_{ijk}^{\text{H}} + \frac{V_{ijk}^{\Pi}}{\alpha_{ij} \rho_{ijk}} \right), \quad (14)$$

где ξ_{ijk} , η_{ijk} — случайные величины, однако функции их распределения предполагаются известными.

На основании приведенного выше решение задачи установления состояния выполнения программы реинжиниринга на начало текущего периода заключается в идентификации функции распределения величин $v_{ijk}(T^{\text{OK}})$ мероприятий каждого технологического этапа на ОТИ программы реинжиниринга на момент T^{OK} с учетом ресурсных и временных ограничений. Следует отметить, что вероятностный характер величин $V_{ijk}(T^{\text{OK}})$ связан не только с наличием случайных величин ξ_{ijk} , η_{ijk} в ограничениях данной задачи, но и стохастичностью рассчитываемых в моменты времени t_p приоритетов объектов реинжиниринга $\Pi(t_p)$.

2. Формирование предложений по вновь начинаемым объектам реинжиниринга.

Программа реинжиниринга, помимо переходящих ОТИ (по которым мероприятия уже начаты в предыдущие периоды), вероятно, будет содержать и вновь

начинаемые стройки. Вне зависимости от принадлежности к первой или второй группе в текущем периоде по каждой стройке планируется освоить инвестиций в размере:

$$C_i = W_i + D_i, \quad (15)$$

где W_i — стоимость выполнения работ или реализации мероприятий реинжиниринга; D_i — стоимость монтируемого технологического оборудования; i — номер ОТИ.

Очевидно, что в предыдущем периоде в рамках программ реинжиниринга осуществлены затраты на производство работ, а также покупку и монтаж технологического оборудования соответственно W_i^0 и D_i^0 . Следовательно, в текущем периоде должны быть проведены мероприятия и работы по реинжинирингу ОТИ в объеме

$$V_i = W_i - W_i^0 \quad (16)$$

и смонтировано технологического оборудования на сумму

$$M_i = D_i - D_i^0. \quad (17)$$

Как было определено выше в задаче 1, структура мероприятий по каждому объекту реинжиниринга задается V_{ikj} $1 \leq j \leq M$ (формула (18)), где V_{ikj} — объем j -го мероприятия k -го технологического этапа i -го ОТИ, при этом

$$V_i = V_{ik1} + \dots + V_{ikM}. \quad (18)$$

Установим удельные веса мероприятий реинжиниринга ϵ_{ikj} в общем объеме программы:

$$E_{ijk} = \frac{V_{ikj}}{V_i}. \quad (19)$$

Далее необходимо сформулировать организационно-технологические ограничения по каждому ОТИ, их сущность состоит в установлении соотношений между объемами разных видов работ программы реинжиниринга, которые должны быть выполнены на k -м технологическом этапе. Если стоимость работ, реализованных к некоторому моменту времени, обозначить через σV_{ik} , где $0 \leq \sigma \leq 1$, то организационно-технологические ограничения можно выразить так:

$$\sigma V_{ik} = \beta_{ik1}(\sigma) V_{ik1} + \dots + \beta_{ikM}(\sigma) V_{ikM}. \quad (20)$$

Функция $\beta_{ikj}(\sigma)$ определяет ход осуществления реинжиниринговых мероприятий и потребления ресурсов, которые монотонно возрастают и соответствуют условиям:

$$\beta_{ikj}(0) = 0, \beta_{ikj}(1) = 1. \quad (21)$$

Таким образом, организационно-технологическую модель реинжиниринга нескольких ОТИ можно задать системой параметров V_i , ϵ_{ikj} , $\beta_{ikj}(\sigma)$, удовлетворяющих принятым в задаче ограничениям.

Аналогично задаче 1 последовательность (t_p) $T^{\text{H}} \leq t_p \leq T^{\text{OK}}$ устанавливает моменты времени, в ко-

торые принимаются решения о выделении ресурсов на объекты реинжиниринга.

Примем через $C_{ik}(t)$ стоимость работ, выполненных на i -м объекте реинжиниринга. В силу организационно-технологических ограничений объем выполненных мероприятий j -го вида равен:

$$C_{ikj}(t) = \beta_{ikj}(\sigma)V_{ikj}, \quad (22)$$

где

$$\sigma = \frac{C_{ikj}(t)}{C_i}. \quad (23)$$

Под единицей трудовых ресурсов будем рассматривать как отдельного исполнителя, так и профессиональные команды определенного квалификационного состава, обеспеченные необходимыми техническими средствами как звено и бригада. Трудовые ресурсы задаются вектором $L = (L_1, \dots, L_M)$ и характеризуются некоторой выработкой на j -м мероприятии k -го технологического этапа на i -й стройке B_{ikj} .

Назначение трудовых ресурсов на объекты реинжиниринга транспортной инфраструктуры в каждый момент времени t_p происходит в следующем порядке: в первую очередь обеспечиваются наиболее приоритетные стройки, затем менее приоритетные в порядке проведенного в задаче 1 ранжирования.

Следуя логике задачи, обозначим через $l_{ikj}(t_p)$ выделенное на j -е мероприятие k -го технологического этапа i -го ОТИ в период времени (t_p, t_{p+1}) определенное количество трудовых ресурсов. Переменные $l_{ikj}(t_p)$ должны удовлетворять ограничениям, так как:

1) общее количество трудовых ресурсов на j -м мероприятии ограничено величиной L_j

$$\sum_{ik} l_{ikj}(t_p) \leq L_j; \quad (24)$$

2) по характеру реализуемых мероприятий (например, наличие стесненности) количество трудовых ресурсов, которое можно использовать в период времени (t_p, t_{p+1}) на j -м мероприятии k -го технологического этапа i -го объекта, ограничено технологически допустимым насыщением фронта работ ресурсами

$$L_{ijk}(t_p) \leq L_{ijk}^{\max}. \quad (25)$$

На работу трудовых ресурсов однозначно влияют поставки материалов, изделий, конструкций. Возможные срывы поставок материальных ресурсов, необходимых для выполнения j -го мероприятия k -го технологического этапа на i -м ОТИ, обозначим через φ_{ijk} . Следовательно, время потребления ресурса на j -м мероприятии в период времени (t_p, t_{p+1}) равно

$$T_{ikj} = \max(t_{p+1} - t_p - \varphi_{ijk}, 0). \quad (26)$$

Итак, процедура назначения трудовых ресурсов для реализации мероприятий и проведения работ реинжиниринга в интервале времени (t_p, t_{p+1}) состо-

ит в следующем: назначается максимально возможное количество людей $l_{ikj}(t_p)$ с учетом приоритета объекта, допустимого насыщения фронта работ ресурсами и ограничений на общий объем трудовых ресурсов.

Затем осуществляется процедура корректировки и окончательно выбирается количество трудовых ресурсов, равное $l_{ikj}(t_p)$. Ниже следует описание процедуры корректировки.

С учетом времени работы T_{ikj} и количества первоначально назначенных трудовых ресурсов $l_{ikj}(t_p)$ к концу периода времени (t_p, t_{p+1}) можно выполнить объем программы реинжиниринга (в стоимостном выражении)

$$C_{ikj}(t_{p+1}) = c_{ikj}(t_p) + B_{ikj}T_{ikj}l_{ikj}(t_p). \quad (27)$$

Решая уравнение относительно σ ,

$$c_{ikj}(t_{p+1}) = \beta_{ikj}(\sigma)V_{ikj}, \quad (28)$$

найдем множество решений σ_{ikj} . Примем:

$$\sigma = \min_{i,j,k} \sigma_{ikj}. \quad (29)$$

В силу существующих организационно-технологических ограничений объем реализованных мероприятий не будет превосходить $\tilde{c}_{ik}(t_{p+1})$, где

$$\tilde{c}_{ik}(t_{p+1}) = \sigma V_{ik}. \quad (30)$$

По видам работ можно выполнить объем работ (в силу организационно-технологических ограничений), не превосходящий величины:

$$\tilde{c}_{ikj}(t_{p+1}) = \beta_{ikj}(\sigma)V_{ikj}. \quad (31)$$

При этом оказывается, что количество трудовых ресурсов $l_{ikj}(t_p)$ отличается от потребного:

$$\Delta l_{ikj}(t_p) = \frac{c_{ikj}(t_{p+1}) - \tilde{c}_{ikj}(t_{p+1})}{B_{ikj}T_{ikj}}. \quad (32)$$

Отсюда следует, что на работу должно быть назначено количество трудовых ресурсов в размере

$$\tilde{l}_{ikj}(t_p) = l_{ikj}(t_p) - \Delta l_{ikj}(t_p). \quad (33)$$

К концу текущего периода T^{OK} будет реализован по k -му технологическому этапу i -го объекта объем строительно-монтажных работ, равный $c_{ik}(T^{OK})$, а в целом по i -му объекту реинжиниринга объем работ равен

$$c_i(T^{OK}) = \sum_k c_{ik}(T^{OK}). \quad (34)$$

В силу использования предложений величина $c_i(T^{OK})$ — случайная с функцией распределения

$$F_i(x) = P\{c_i(T^{OK}) \leq x\}, \quad (35)$$

а совместная функция распределения случайного вектора

$$c(T) = (c_1(T^{OK}), \dots, c_M(T^{OK})) \quad (36)$$

равна выражению

$$F(x_1, \dots, x_N) = P\{c_1(T^{OK}) \leq x_1, \dots, c_N(T^{OK}) \leq x_N\}. \quad (37)$$

На основании вышеизложенного можно констатировать, что решение задачи формирования предложений по вновь начинаемым объектам реинжиниринга транспортной инфраструктуры заключается в нахождении функции распределения $F(x_1, \dots, x_N)$, причем переменные задачи должны удовлетворять существующим ограничениям.

Задавшись параметром γ , $0 \leq \gamma \leq 1$ можно найти из уравнения

$$P\{c_1(T^{OK}) \geq c_1^\gamma, \dots, c_N(T^{OK}) \geq c_N^\gamma\} = \gamma \quad (38)$$

некоторую совокупность объектов программы реинжиниринга транспортной инфраструктуры с заданной вероятностью реализации γ

$$c^\gamma = (c_1^\gamma, \dots, c_N^\gamma). \quad (39)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Переход к постиндустриальному развитию общества ознаменовал смену технологического уклада, что обусловило необходимость качественного преобразования существующих бизнес-процессов и инженерных решений. Такая трансформация получила название «реинжиниринг», его теоретические и методологические основы заложили в своих трудах М. Хаммер и Дж. Чампи. В настоящем данная концепция распространена на технические решения во всех сферах деятельности. Исследования проблематики развития реинжиниринга в рассматриваемой предметной области освещены в публикациях многих авторов, а также находят подтверждение в трудах

отечественных ученых, занимающихся исследованиями постиндустриального этапа развития общества.

Опираясь на научные публикации, в своем исследовании авторы предлагают в качестве конкретного инструментария управления трансформациями ОТИ, учитывающего современные тенденции общественного развития, логистику регулирующих воздействий. Формирование теоретического и методологического задела в данном научном направлении связано с исследованиями С.Б. Сборщикова и рядом зарубежных авторов научных работ.

Таким образом, результатом решения указанных задач будет не только установление объема выполненных работ по переходящим ОТИ и формирование рекомендаций по вновь начинаемым объектам реинжиниринга, а также распределение материально-технических и трудовых ресурсов по объектам, мероприятиям инвестиционной программы и этапам жизненного цикла зданий, сооружений. В этой связи можно утверждать, что формализованное представление управления реинжиниринговыми мероприятиями должно стать генезисом системы информационно-аналитического обеспечения, которая, помимо прочего, будет способствовать оптимальному потреблению материально-технических ресурсов и эффективному плану их поставок. В конечном счете, это должно привести к сокращению стоимости и продолжительности реинжиниринга ОТИ.

Данное исследование может быть продолжено по следующим перспективным направлениям: реинжиниринг технологических процессов, реинжиниринг процессов управления, реинжиниринг организационных структур, реинжиниринг территорий и застройки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сборщиков С.Б., Маслова Л.А., Журавлев П.А. Реинжиниринг в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 7. С. 71–76. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.07.71-76
2. Сборщиков С.Б., Маслова Л.А. Элементы информационно-аналитического обеспечения реинжиниринга объектов капитального строительства // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 7. С. 912–921. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.912-921
3. Сборщиков С.Б., Маслова Л.А. Реинжиниринг объектов капитального строительства и реинжиниринг технологических процессов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 10. С. 1321–1330. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1321-1330
4. Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В., Маслова Л.А. Ресурсообеспечение реинжиниринга объектов капитального строительства // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 12. С. 66–71. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.12.66-71
5. Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В., Маслова Л.А. Параметры реинжиниринга технологических процессов // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 4. С. 28–33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.04.28-33
6. Сборщиков С.Б., Лазарева Н.В. Формирование дополнительного эффекта при управлении стоимостью инвестиционного проекта за счет мероприятий реинжиниринга // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 2 (79). С. 252–263. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-2-252-263
7. Сборщиков С.Б., Журавлев П.А. Жизненный цикл градостроительных решений: организационный аспект их реинжиниринга // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 4. С. 33–39.
8. Сборщиков С.Б., Лейбман Д.М. Формализованное описание функционирования системы стратегического контроллинга // Вестник МГСУ. 2016.

№ 10. С. 151–159. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.10.151–159

9. Розанов Ф.И. Управляемое общество как новый уровень эволюции социальных систем // Russian Journal of Education and Psychology. 2013. № 5 (25). DOI: 10.12731/2218-7405-2013-5-36

10. Коннов В.С. Возникновение информационного общества как результат мировой глобализации // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. 2009. № 3 (27). С. 36–38.

11. Томских М.С. Концепция качества жизни в трудах представителей постиндустриализма // Гуманитарный вектор. 2015. № 2 (42). С. 167–172.

12. Яковлева Е.В. Трудовая деятельность в условиях инновационной экономики: специфика, организация, управление // Гуманитарный научный журнал. 2017. № 1. С. 100–106.

13. Одегов Ю.Г., Павлова В.В., Теленная Л.С. Технологические предпосылки трансформации сферы труда // Уровень жизни населения регионов России. 2018. № 4 (210). С. 69–75. DOI: 10.24411/1999-9836-2018-10041

14. Сборщиков С.Б. Логистика регулирующих воздействий в инвестиционно-строительной сфере: теория, методология и практика : дис. ... д-ра экон. наук. М., 2012. 308 с.

15. Sborshikov S., Bobin A. Formal description model management of cluster structures in construction // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 05032. DOI: 10.1051/mateconf/201825105032

16. Shibeika A., Harty C. Diffusion of digital innovation in construction: a case study of a UK engineering firm // Construction Management and Economics. 2015. Vol. 33. Issue 5–6. Pp. 453–466. DOI: 10.1080/01446193.2015.1077982

17. Wao J., Ries R., Flood I., Kibert C. Refocusing value engineering for sustainable construction // 52nd ASC Annual International Conference Proceedings. 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.1323.6723

18. Eskerod P., Huemann M., Savage G. Project stakeholder management — past and present // Project Management Journal. 2015. Vol. 46. Issue 6. Pp. 6–14. DOI: 10.1002/pmj.21555

19. Rad K.M., Yamini O.A. The methodology of using value engineering in construction projects management // Civil Engineering Journal. 2016. Vol. 2. Issue 6. P. 262. DOI: 10.28991/cej-030986

20. Ilayaraja K., Eyaabal Z. Value engineering in construction // Indian Journal of Science and Technology. 2015. Vol. 8. Issue 32. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i32/87285

Поступила в редакцию 11 марта 2022 г.

Принята в доработанном виде 24 мая 2022 г.

Одобрена для публикации 24 мая 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: Сергей Борисович Сборщиков — доктор экономических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии, организации и управления в строительстве; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 431022, ResearcherID: Q-6433-2017, ORCID: 0000-0001-5888-3019; sbs@mgsu.ru;

Любовь Александровна Маслова — аспирант корпоративной кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2762-2711, ORCID: 0000-0002-0561-6571; MaslovaLA@mgsu.ru.

Вклад авторов:

Сборщиков С.Б. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, участие в разработке учебных программ и их реализации, написание исходного текста, итоговые выводы.

Маслова Л.А. — разработка концепции, проведение исследования, описание результатов и формирование выводов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Sborshikov S.B., Maslova L.A., Zhuravlev P.A. Reengineering in construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 7:71-76. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.07.71-76 (rus.).

2. Sborshikov S.B., Maslova L.A. Elements of information and analytical support for the reengineering of capital construction objects. *Vestnik MGSU* [Proceedings

of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:7:912-921. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.912-921 (rus.).

3. Sborshikov S.B., Maslova L.A. Reengineering of capital construction objects and reengineering of technological processes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on

Construction and Architecture]. 2019; 14(10):1321-1330. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.10.1321-1330 (rus.).

4. Sborshikov S.B., Lazareva N.V., Maslova L.A. Resource support of re-engineering of objects of capital construction. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; 12:66-71. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.12.66-71 (rus.).

5. Lazareva N.V., Sborshchikov S.B., Maslova L.A. Parameters of technological processes reengineering. *Industrial and Civil Engineering*. 2020; 4:28-33. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.04.28-33 (rus.).

6. Sborshchikov S.B., Lazareva N.V. Formation of additional effect at management of the investment project cost at the expense of reengineering measures. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 2(79):252-263. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-2-252-263 (rus.).

7. Sborshchikov S.B., Zhuravlev P.A. He life cycle of urban planning solutions: the organizational aspect of their reengineering. *Industrial and Civil Engineering*. 2021; 4:33-39. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.04.33-39 (rus.).

8. Sborshchikov S.B., Leybman D.M. Formalized description of strategic control system functioning. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 10:151-159. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.10.151-159 (rus.).

9. Rozanov F.I. Managed society as the new evolution level of social systems. *Russian Journal of Education and Psychology*. 2013; 5(25). DOI: 10.12731/2218-7405-2013-5-36 (rus.).

10. Konnov V.S. Emergence of the information society as a result of globalized world. *Bulletin of the Saratov State Social and Economic University*. 2009; 3:36-38. (rus.).

11. Tomskih M.S. The concept of life quality in the works of post-industrialism representatives. *Humanities Vector*. 2015; 2(42):167-172. (rus.).

12. Yakovleva E.V. Labor activity in an innovative economy: specifics, organization, management. *Humanitarian Scientific Journal*. 2017; 1:100-106. (rus.).

13. Odegov Yu.G., Pavlova V.V., Telennaya L.S. Technological prerequisites for the transformation of the sphere of labor. *The Standard of Living of the Population of the Regions of Russia*. 2018; 4(210):69-75. DOI: 10.24411/1999-9836-2018-10041 (rus.).

14. Sborshchikov S.B. *Logistics regulatory impacts in the investment and construction sector (theory, methodology, practice) : thesis of candidate of technical sciences*. Moscow, 2012; 308. (rus.).

15. Sborshikov S., Bobin A. Formal description model management of cluster structures in construction. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:05032. DOI: 10.1051/mateconf/201825105032

16. Shibeika A., Harty C. Diffusion of digital innovation in construction: a case study of a UK engineering firm. *Construction Management and Economics*. 2015; 33:5-6:453-466. DOI: 10.1080/01446193.2015.1077982

17. Wao J., Ries R., Flood I., Kibert C. Refocusing value engineering for sustainable construction. *52nd ASC Annual International Conference Proceedings*. 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.1323.6723

18. Eskerod P., Huemann M., Savage G. Project stakeholder management — past and present. *Project Management Journal*. 2015; 46(6):6-14. DOI: 10.1002/pmj.21555

19. Rad K.M., Yamini O.A. The methodology of using value engineering in construction projects management. *Civil Engineering Journal*. 2016; 2(6):262. DOI: 10.28991/cej-030986

20. Ilayaraja K., Eqyaabal Z. Value engineering in construction. *Indian Journal of Science and Technology*. 2015; 8(32). DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i32/87285

Received March 11, 2022.

Adopted in revised form on May 24, 2022.

Approved for publication on May 24, 2022.

B I O N O T E S : **Sergey B. Sborshchikov** — Doctor of Economics Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technology, Organization and Management in Construction; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 431022, ResearcherID: Q-6433-2017; ORCID: 0000-0001-5888-3019; sbs@mgsu.ru; sbs@mgsu.ru;

Lyubov A. Maslova — postgraduate student of the corporate Department of Construction of Thermal and Nuclear Power Facilities; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2762-2711, ORCID: 0000-0002-0561-6571; MaslovaLA@mgsu.ru.

Contribution of the authors:

Sergey B. Sborshchikov — scientific guidance, research concept, development of methodology, participation in the development of training programs and their implementation, writing the source text, final conclusions.

Lyubov A. Maslova — development of the concept, conduct of the study, description of the results and formation of conclusions of the study.

The authors declare that there is no conflict of interest.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 625.89

DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.655-662

Расчет объемов дорожной одежды при ремонте автомобильных дорог в IndorCAD/Road

Ольга Анатольевна Бездельникова¹, Любовь Викторовна Шепелева²

¹Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ); г. Петрозаводск, Россия;

²Кондопожское дорожно-ремонтное строительное управление (Кондопожское ДРСУ); г. Кондопога, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены возможные методы расчета объемов земляных работ, которые широко применяют для вычисления объема дорожной одежды при ремонте и строительстве автомобильных дорог в системе автоматизированного проектирования IndorCAD/Road. Выполнен обзор научных исследований, направленный на выявление причин, влияющих на недостоверный конечный результат объема строительных материалов для возведения дорожной одежды. Цель исследования — анализ всех методов расчета объемов дорожной одежды и их возможные комбинации на участке ремонтируемой автомобильной дороги.

Материалы и методы. Определен оптимальный метод расчета объема дорожной одежды для выполнения ремонтных работ на участке автомобильной дороги протяженностью 3 км из предложенных в системе IndorCAD/Road методов и их комбинаций. Сравнительный анализ проведен относительно метода установления объема по разности отметок поверхности дорожной одежды, который возможно применить после окончания ремонтных работ. Объем, рассчитанный данным методом, был принят за истинный.

Результаты. По результатам отклонений объемов дорожно-строительных материалов для производства ремонтных работ участка автомобильной дороги, рассчитанных рассматриваемыми методами от истинного значения объема и затрат на их приобретение, был выбран оптимальный метод расчета объема. Сравнительный анализ показал, что рекомендуемым к применению на практике из имеющихся методов является классический метод с учетом поправки на радиус кривизны в плане, так как на этапе проектирования полученные им значения объемов максимально приближены к реальным.

Выводы. Обоснована целесообразность использования предложенного метода на практике и описаны основные трудности его применения. Предложены рекомендации, направленные на доработку методов расчетов объемов дорожной одежды в системе автоматизированного проектирования IndorCAD/Road.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: расчет объема, дорожная одежда, земляные работы, IndorCAD/Road, проектирование дорог, ремонт дорог, строительство дорог, автомобильная дорога, строительные материалы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бездельникова О.А., Шепелева Л.В. Расчет объемов дорожной одежды при ремонте автомобильных дорог в IndorCAD/Road // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 5. С. 655–662. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.655-662

Автор, ответственный за переписку: Ольга Анатольевна Бездельникова, olga402b@mail.ru.

Using IndorCAD/Road software to calculate the amount of road pavement materials needed to repair a motor road

Olga A. Bezdelnikova¹, Lubov V. Shepeleva²

¹Petrozavodsk State University (PetrSU); Petrozavodsk, Russian Federation;

²Kondopoga Road Repair and Construction Department; Kondopoga, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors have applied the IndorCAD/Road computer-aided design system to study several earthwork calculation methods widely used to analyze the amount of road pavement materials needed to repair and build motor roads. The authors have also reviewed research studies focused on identifying the reasons that influence the unreliable ultimate amount of road pavement materials. The purpose of the study is to analyze all methods used to calculate the amounts of road pavement materials and their potential combinations used to repair a motor road section.

Materials and methods. The authors have chosen the optimal method for calculating the amount of road pavement materials for a section of a motor road that is three kilometers long. The method has been chosen from among several methods and their combinations, offered by the IndorCAD/Road system. The authors compared these methods with the method of identifying the amount of road pavement materials depending on a difference in pavement surface levels, which is applicable after the completion of repair work. The amount of materials, calculated using this method, is considered to be trustworthy.

Results. The optimal calculation method is chosen with account taken of deviations from the trustworthy amount of road-building materials and their costs, obtained using the above-considered methods. The comparative analysis has proven that of all the methods available today the classical method is recommended for practical use if it takes into account the adjustment for the radius of curvature in plan, since the values of amounts are as close as possible to realistic ones at the design stage.

Conclusions. The expediency of using the proposed method in practice is substantiated, and the main difficulties of its application are described. Recommendations are made to improve methods of calculating the amounts of road pavement materials using IndorCAD/Road software.

KEYWORDS: calculation of volume, road pavement, earthwork, IndorCAD/Road, road design, road repair, road building, motor road, construction materials

FOR CITATION: Bezdelnikova O.A., Shepeleva L.V. Using IndorCAD/Road software to calculate the amount of road pavement materials needed to repair a motor road. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(5):655-662. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.5.655-662 (rus.).

Corresponding author: Olga A. Bezdelnikova, olga402b@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет объемов строительных материалов, необходимых для ремонта и строительства автомобильных дорог, является значимым этапом на стадии проектирования. В настоящее время повсеместно внедряются BIM-технологии, цель которых — систематизация всех этапов проектирования автомобильных дорог, но на практике чаще используют системы автоматизированного проектирования. В Российской Федерации широко применяют системы автоматизированного проектирования зарубежного (AutoCAD Civil 3D, CREDO) и отечественного (IndorCAD/Road) производства. Все программные продукты направлены на виртуальную визуализацию объекта строительства или ремонта [1–3] с возможностью определения объемов земляных работ [4, 5] и дорожной одежды [6, 7], а также документальное их сопровождение.

Объем земляных работ и дорожной одежды вычисляется одинаковыми методами. Корректный расчет итоговых объемов существенно влияет на конечную стоимость автомобильной дороги. Этой проблеме посвящены научные труды, в которых рассматриваются причины, воздействующие на их значения. К ним относят работы, в которых разработаны математические зависимости и модели влияния крутизны косогоров [8], криволинейности участка автомобильной дороги [9], величины насыпей [10] и кривых малых радиусов, на участках которых устраивается вираж с целью дополнительного уширения земляного полотна [11], геометрии поперечного профиля и оптимизации его выравнивания [12–14], а также их технико-экономическое обоснование [15]. Перечисленные зависимости помогают рассматривать дорогу с позиции сложных геометрических форм конструкции земляного полотна, влияющих на параметры дороги, поэтому находят практическое применение в системах автоматизированного проектирования [16].

При проектировании дорожной одежды рассчитывают объемы строительных материалов для возведения основания и покрытия. В САПР IndorCAD/Road расчет дорожной одежды возможен

одним из четырех способов: классический метод (метод усредненных площадей); метод усеченных пирамид; классический метод с учетом поправки на радиус кривизны в плане; построение 3D-модели слоя¹. Также объем высчитывают как разность отметок поверхностей дорожной одежды. На практике в основном используют классический метод расчета, опирающийся на определение площадей сечений, ограничивающих слой, и линейное расстояние между ними. Объем, рассчитанный по данному способу, неточен и не совпадает с реальным значением, так как классический способ расчета объемов учитывает конструктивные особенности прямолинейных участков. При использовании его на круговых и переходных кривых полученные объемы не соответствуют действительности². Поэтому значение объема дорожной одежды, установленное классическим методом, сравнивают с объемом, полученным в результате расчета по разности отметок поверхностей дорожной одежды, чтобы минимизировать неточности расчетов.

Научная составляющая работы заключается в том, чтобы всесторонне изучить описанную проблему и найти ее оптимальное решение, используя имеющиеся для этого методы расчета объемов дорожной одежды, которые широко применяются на практике, и их возможные комбинации на реальном примере участка автомобильной дороги. Подобный подход позволяет обосновать полученные результаты с точки зрения всех возможных вариантов расчета объемов и сформулировать те рекомендации, которые позволят внести определенные коррективы в последовательность их расчета.

Цель исследования — анализ всех методов расчета объемов дорожной одежды и их возможные комбинации на участке ремонтируемой автомобиль-

¹ Методы расчета объемов земляных работ. URL: http://help.indorsoft.ru/IndorCADRoad/Content/R_Earthworks/Earthworks_Volumes_Methods.htm

² Бушувев М. СНИПы не тормозят. Тормозит отсутствие инструкций // *Вестник инженерных изысканий*. 9 августа 2020. URL: <http://izyskateli.info/2020/08/snipy-ne-tormozyat-tormozit-otsutstvie-instrukcij>

ной дороги. За истинное значение объема дорожной одежды примем результат, рассчитанный через разность отметок поверхностей дорожной одежды. Этот способ расчета максимально показывает реальные значения расхода строительных материалов, так как объем определяется после окончания ремонтных работ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — автомобильная дорога протяженностью 3 км пятой категории, подлежащая ремонту. Типы укладываемой дорожной одежды: облегченные с асфальтобетонным покрытием, щебеночно-песчаной смесью марки С5 (ЩПС С5) в качестве основания и отсыпки обочин на территории населенного пункта; переходные с покрытием и отсыпкой обочин щебеночно-песчаной смесью С2 (ЩПС С2), укладываемые на разрыхленный грунт в качестве основания.

Рассчитаем объемы дорожной одежды в системе автоматизированного проектирования IndorCAD/Road возможными методами и их комбинациями. Большая часть бюджета, выделенного на ремонтные работы автомобильных дорог, уходит на земляные работы и приобретение строительных материалов [17–20].

Для удобства примем следующие обозначения: 1 — классический метод (метод усредненных площадей); 2 — метод усеченных пирамид; 3 — классический метод с учетом поправки на радиус кривизны в плане; 4 — построение 3D-модели слоя; 1 на прямых, 3 на кривых — комбинация классического метода (метод усредненных площадей) на прямых и классического метода с учетом поправки на радиус кривизны в плане на кривых; 2 на прямых, 3 на кривых — комбинация метода усеченных пирамид на прямых и классического метода с учетом поправки на радиус кривизны в плане на кривых; РОПДО — разность отметок поверхностей дорожной одежды.

При выполнении расчетов участок автомобильной дороги был разделен на 37 частей, состоящих из прямых и кривых: 31 участок протяженностью 2543,6 м с переходным типом покрытия; 5 участков протяженностью 272,3 м с облегченным асфальтобетонным типом покрытия и 2 участка протяженностью 184,1 м, на которых происходит переход от переходного типа к облегченному асфальтобетонному типу и наоборот. Протяженность прямых вставок между кривыми находится в диапазоне от 11,8 до 181,8 м; радиусы вписанных кривых — от 42,3 до 2000 м.

В процессе расчета объемов дорожной одежды методами 1–4 и РОПДО вычисления осуществлялись по всей трассе; при комбинации методов 1 и 2 на прямых с методом 3 на кривых результаты рассчитывались по частям. Объем, вычисленный как разность отметок поверхностей дорожной одежды,

примем за истинное значение объема, относительно которого будем проводить сравнение.

По данным объемов необходимых строительных материалов для ремонта участка автомобильной дороги сложно делать какие-либо выводы. Поэтому для наглядности рассчитали затраты на их приобретение в ценах 4 квартала 2020 г. с учетом НДС: асфальт марки П тип Б — 4335 руб./т; ЩПС С2 — 314,5 руб./т; ЩПС С5 — 318,75 руб./т. Затраты на рыхление грунта для основания при возведении переходного типа дорожной одежды из ЩПС С2 не учитывались.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализируемыми данными в результате исследования является отклонение объемов строительных материалов для возведения дорожной одежды по участку трассы, определенных рассматриваемыми методами, и затрат на их приобретение от истинных значений, полученных в результате применения метода РОПДО (табл.).

По данным отклонениям построена гистограмма распределения объема строительных материалов и затрат на их приобретение для ремонта участка автомобильной дороги протяженностью 3 км от применяемых методов расчета объемов дорожной одежды (рис.).

Анализ полученных результатов продемонстрировал следующее. Отрицательные значения отклонений объемов строительных материалов и затрат на их приобретение показывают их нехватку, а следовательно, при планировании следует закладывать дополнительные средства на их приобретение. Подобная ситуация возникает при применении классического метода 1, метода усеченных пирамид 2 и метода, основанного на комбинации метода усеченных пирамид на прямых и классического метода с учетом поправки на радиус кривизны в плане на кривых (2 на прямых, 3 на кривых).

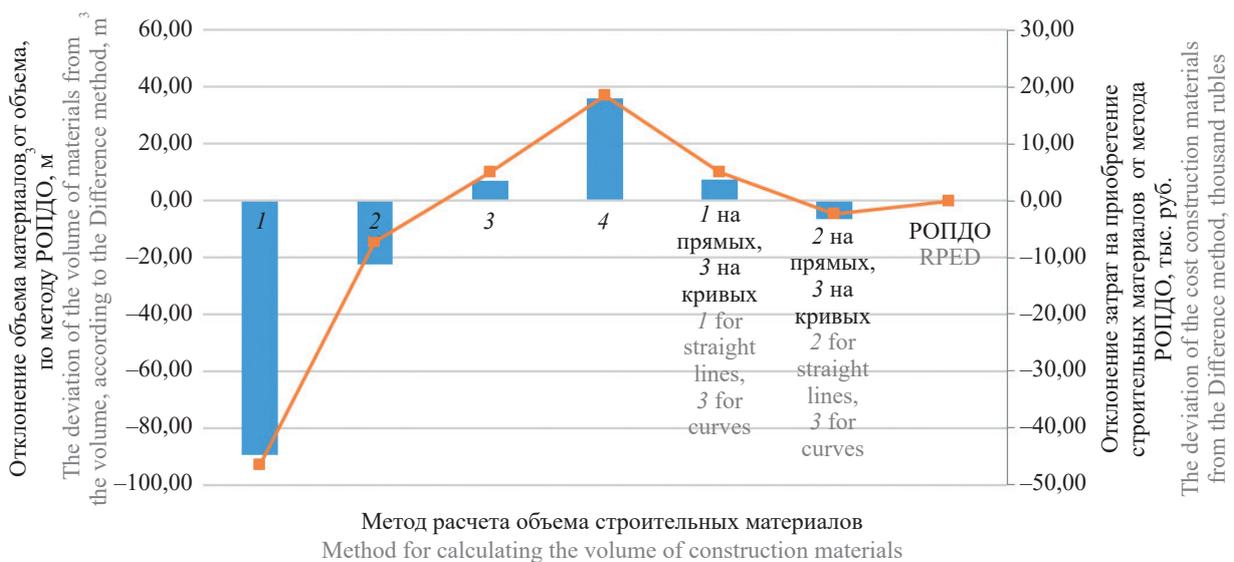
При расчете объемов дорожной одежды классическим методом с учетом поправки на радиус кривизны в плане, методом построения 3D-модели слоя и комбинацией классического метода на прямых и классического метода с учетом поправки на радиус кривизны в плане на кривых (1 на прямых, 3 на кривых) положительные значения отклонений объемов строительных материалов и затрат указывают на их перерасход, а значит, перерасход денежных средств на их приобретение.

Исходя из анализа результатов необходимо определить, какой из возможных методов лучше принимать для расчета объема дорожной одежды. Для этого требуется учитывать транспортные расходы на подвоз требуемых объемов строительных материалов. Если карьер находится на незначительном расстоянии от объекта строительства, то целесообразно использовать комбинированный метод расчета дорожной одежды — метод усеченных

Результаты исследования

Research results

Метод расчета объема дорожной одежды Method for calculating the amount of road pavement materials	Объем строительных материалов Amount of construction materials			Затраты на строительные материалы Costs of construction materials		
	По трассе, м ³ Along the road, m ³	Отклонение от РОПДО, м ³ Deviation from difference in pavement surface levels, m ³	Отклонение от РОПДО, % Deviation from difference in pavement surface levels, %	По трассе, тыс. руб. Along the road, in thousand rubles	Отклонение от РОПДО, тыс. руб. Deviation from difference in pavement surface levels, thousand rubles	Отклонение от РОПДО, % Deviation from difference in pavement surface levels, %
1	14 059,45	-89,55	-0,633	8896,84	-46,34	-0,518
2	14 126,55	-22,45	-0,159	8935,90	-7,29	-0,081
3	14 156,11	7,11	0,050	8948,21	5,02	0,056
4	14 184,89	35,89	0,254	8961,69	18,50	0,207
1 на прямых, 3 на кривых 1 for straight lines, 3 for curves	14 156,21	7,21	0,051	8948,26	5,08	0,057
2 на прямых, 3 на кривых 2 for straight lines, 3 for curves	14 142,31	-6,69	-0,047	8940,76	-2,43	-0,027
РОПДО A difference in pavement surface levels ("Difference method")	14 149,00	0,00	0,000	8943,19	0,00	0,000



Соотношение методов расчета дорожной одежды от отклонения объема строительных материалов и затрат на их приобретение относительно метода РОПДО

The correlation between methods of calculating road pavement amounts, depending on the deviation of the volume of building materials and the cost of their purchase, relative to the Difference method

пирамид на прямых и классический метод с учетом поправки на радиус кривизны в плане на кривых (2 на прямых, 3 на кривых), поскольку расхождение объемов материалов от истинного значения составляет $-0,047\%$, затраты на приобретение материалов увеличатся на $-0,027\%$. Если подвоз строительных материалов из ближнего карьера организовать невозможно, есть смысл рассчитать объем строительных материалов классическим методом с учетом поправки на радиус кривизны в плане, так как при его применении суммарный объем строительных материалов завышен на $0,050\%$, а перерасход денежных средств составляет $0,056\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. На практике для расчета объемов строительных материалов в основном применяют классический метод (метод усредненных площадей), так как его математическое обеспечение позволяет перепроверить полученный результат. Выявлено, что его применение нецелесообразно на протяжении всей трассы в связи с высоким значением погрешности.

2. При расчете объема дорожной одежды комбинацией метода усеченных пирамид на прямых и классического метода с учетом поправки на радиус кривизны в плане на кривых полученный объем строительных материалов максимально приближен к реальному значению, рассчитанному через разность отметок поверхностей дорожной одежды. Поэтому рекомендуется включить его в список методов, поддерживаемых системой автоматизированного проектирования.

3. Так как в системе автоматизированного проектирования IndorCAD/Road нет возможности рас-

считать объем дорожной одежды с использованием комбинаций предложенных методов на прямых и кривых участках автомобильной дороги, то для расчета объемов дорожной одежды следует использовать классический метод с учетом поправки на радиус кривизны в плане вне зависимости от местоположения карьера, из которого привозят строительные материалы. Применение данного метода на практике вызывает недоверие в связи с тем, что полученный результат невозможно перепроверить. Это связано с тем, что в формуле расчета объема фигурирует величина, называемая «сдвиг центра тяжести сечения относительно оси трассы», расчет которой непонятен даже с точки зрения теории. Поэтому было бы нелишним в онлайн-документации привести четкие пояснения и графические схемы, позволяющие сформировать представление о том, как работает данный метод для широкого круга пользователей.

4. За истинный объем необходимых строительных материалов для ремонта участка автомобильной дороги протяженностью 3 км был принят результат, полученный в итоге применения метода разности отметок поверхности дорожной одежды — $14\,149,00\text{ м}^3$. Максимально к эталонному объему приближены значения, полученные в результате применения комбинации метода усеченных пирамид на прямых и классического метода с учетом поправки на радиус кривизны в плане на кривых, итог объема — $14\,142,31\text{ м}^3$ и классического метода с учетом поправки на радиус кривизны в плане, использованного на всем протяжении трассы, результат — $14\,156,11\text{ м}^3$. Если рассчитать среднее значение по двум методам расчета, то в результате усредненный итоговый объем необходимых строительных материалов будет равен $14\,149,21\text{ м}^3$, отклонение от истинного объема составляет $0,21\text{ м}^3$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пронина Л.А., Тимошенко А.С., Гарусев А.В. Опыт применения программы Топоматик Robur при капитальном ремонте автодороги // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. 2021. № 1 (24). С. 6.

2. Mijić N. Application of the airborne LIDAR technology on the quarry using AutoCAD Civil 3D software // Advanced Technologies, Systems, and Applications III. 2019. Pp. 43–51. DOI: 10.1007/978-3-030-02577-9_6

3. Lopes E.C., Menezes R.R.V., da Silva T.O., Pitanga H.N., dos Santos A.D.P., Ferraz A.S. Comparative study of software for road geometric design // Acta Scientiarum. Technology. 2019. Vol. 41. Issue 1. P. 36959. DOI: 10.4025/actascitechnol.v41i1.36959

4. Бикбулатова Г.Г., Страхов Д.А. Подсчет объемов земляных работ в Civil 3D на примере

автомобильной дороги // Устойчивое развитие земельно-имущественного комплекса муниципального образования: землеустроительное, кадастровое и геодезическое сопровождение : сб. мат. I Нац. науч.-практ. конф., Омск, 15 октября 2020 г. Омск, 2020. С. 36–40.

5. Пуцак О.Н., Сорокина Ю.Е., Ильин С.Н. Использование программного комплекса Credo для определения объемов земляных работ // Устойчивое развитие земельно-имущественного комплекса муниципального образования: землеустроительное, кадастровое и геодезическое сопровождение : сб. мат. I Нац. науч.-практ. конф., Омск, 15 октября 2020 г. Омск, 2020. С. 194–196.

6. Бикбулатова Г.Г., Страхов Д.А. Составление поперечного профиля конструкции дорожной одежды средствами программного продукта AutoCAD

Civil 3D // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. 2021. № 4 (27).

7. Дормидонтова Т.В., Бабич Е.А. Исследование влияния использования САПР на результат расчета дорожной одежды // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре : сб. ст. 77-й Всерос. науч.-техн. конф. 2020. С. 132–137.

8. Морковин В.А., Кириллов Ф.А. Влияние косогорности местности на объемы дорожных земляных работ // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 77. С. 385–494.

9. Аникеев Е.А., Затворницкий А.П. Математическая модель криволинейного участка автодороги // Моделирование систем и процессов. 2010. № 1–2. С. 5–9.

10. Афоничев Д.Н., Морковин В.А., Занин А.А. Дифференцированный расчет объемов земляных работ по элементам земляного полотна на участках малых насыпей // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2012. № 1 (325). С. 33–37.

11. Морковин В.А. Особенности расчета объема земляных работ на участках кривых малого радиуса лесных автомобильных дорог // Лесотехнический журнал. 2011. № 2 (2). С. 22–24.

12. Artun A., Badenko V., Volkova Y., Radaev A. Minimizing earthwork volumes by optimizing vertical alignment with linear programming algorithm // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 224. P. 03028. DOI: 10.1051/e3sconf/202022403028

13. Ozkan E., Tuydes-Yaman H., Acar S.O. Vertical alignment optimisation in highway design by means of mesh adaptive direct search // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Transport. 2021. Pp. 1–12. DOI: 10.1680/jtran.20.00054

14. Sushma M.B., Roy S., Maji A. Exploring and exploiting ant colony optimization algorithm for

vertical highway alignment development // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2022. DOI: 10.1111/micc.12814

15. Саблин С.Ю., Скрыпников А.В., Высоцкая И.А., Болтнев Д.Е., Брюховецкий А.Н. Система технико-экономического обоснования геометрических элементов автомобильных дорог // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2021. Т. 14. № 1 (68). С. 41–45. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_1_41

16. Афоничев Д.Н. Совершенствование расчета профильного объема земляных работ в системе автоматизированного проектирования // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 75. С. 419–430.

17. Сушков С.И., Болотских Л.В., Каратаева Т.В. Совершенствование поставок дорожно-строительных материалов в условиях нестабильности ценообразования // Высокие технологии в строительном комплексе. 2018. № 1. С. 13–18.

18. Земсков А.В., Фомичева Е.Р., Клыков М.С. Анализ подходов к определению запасов материалов на складе дорожно-строительной организации // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2016. Т. 1. С. 464–467.

19. Wang J., Wang X., Shou W., Chong H.-Y., Guo J. Building information modeling-based integration of MEP layout designs and constructability // Automation in Construction. 2016. Vol. 61. Pp. 134–146. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.10.003

20. Khalil I.G., Mohamed A., Smail Z. Building Information Modeling for rural road design: A case study / 2021 16th International Conference on Electronics Computer and Computation (ICECCO). 2021. DOI: 10.1109/ICECCO53203.2021.9663761

Поступила в редакцию 10 марта 2022 г.

Принята в доработанном виде 24 мая 2022 г.

Одобрена для публикации 24 мая 2022 г. 2022 г.

ОБ АВТОРАХ: **Ольга Анатольевна Бездельникова** — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологий и организации строительства, Институт лесных, горных и строительных наук; **Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ)**; 185035, г. Петрозаводск, пр-т Ленина, д. 29; РИНЦ ID: 821944; olga402b@mail.ru;

Любовь Викторовна Шепелева — инженер производственно-технического отдела Управления производством; **Кондопожское дорожно-ремонтное строительное управление (Кондопожское ДРСУ)**; 186225, г. Кондопога, ул. Советов, д. 138; sigel777@mail.ru.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Pronina L., Tymoshenko A., Garusev A. Experience in using the topomatic robur program for major road repairs. *Electronic scientific and methodological journal of the Omsk State Agrarian University*. 2021; 1(24):6. (rus.).

2. Mijić N. Application of the airborne LIDAR technology on the quarry using AutoCAD Civil 3D software. *Advanced Technologies, Systems, and Applications III*. 2019; 43-51. DOI: 10.1007/978-3-030-02577-9_6
3. Lopes E.C., Menezes R.R.V., da Silva T.O., Pitanga H.N., dos Santos A.D.P., Ferraz A.S. Comparative study of software for road geometric design. *Acta Scientiarum. Technology*. 2019; 41(1):36959. DOI: 10.4025/actascitechnol.v41i2.36959
4. Bikbulatova G.G., Strakhov D.A. Calculation of the volume of earthworks in civil 3D on the example of a highway. *Sustainable development of the land and property complex of the municipality: land management, cadastral and geodetic support : collection of materials I National Scientific and Practical Conference, Omsk, October 15, 2020*. Omsk, 2020; 36-40. (rus.).
5. Pushchak O.N., Sorokina Yu.E., Ilyin S.N. Using the credo software package to determine the volume of earthworks. *Sustainable development of the land and property complex of the municipality: land management, cadastral and geodetic support : collection of materials of the I National Scientific and Practical Conference, Omsk, October 15, 2020*. Omsk, 2020; 194-196. (rus.).
6. Bikbulatova G.G., Strakhov D.A. Drawing up a transverse profile of the pavement structure using the AutoCAD Civil 3D software product. *Electronic scientific and methodological journal of the Omsk State Agrarian University*. 2021; 4(27). (rus.).
7. Dormidontova T.V., Babich Y.A. Study of cad use impact on road surface calculation result. *Traditions and innovations in construction and architecture: collection of articles of the 77th All-Russian Scientific and Technical Conference, 2020*; 132-137. (rus.).
8. Kirillov F.A., Kirillov F.A. Influence of hilly terrain slope on the volume of road earthwork. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*. 2012; 77:385-494. (rus.).
9. Anikeev E.A., Zatvornitsky A.P. Mathematical model of a curved section of a highway. *Modeling of Systems and Processes*. 2010; 1-2:5-9. (rus.).
10. Afonichev D.N., Morkovin V.A., Zanin A.A. Earth works volumes differential calculations based on the earth-bed elements of the small embankments plots. *Russian Forestry Journal*. 2012; 1(325):33-37. (rus.).
11. Morkovin V.A. Peculiarities of calculating the volume of earthworks on small-radius curves of forest highways. *Lesotechnical Journal*. 2011; 2(2):22-24. (rus.).
12. Artun A., Badenko V., Volkova Y., Radaev A. Minimizing earthwork volumes by optimizing vertical alignment with linear programming algorithm. *E3S Web of Conferences*. 2020; 224:03028. DOI: 10.1051/e3s-conf/202022403028
13. Ozkan E., Tuydes-Yaman H., Acar S.O. Vertical alignment optimisation in highway design by means of mesh adaptive direct search. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Transport*. 2021; 1-12. DOI: 10.1680/jtran.20.00054
14. Sushma M.B., Roy S., Maji A. Exploring and exploiting ant colony optimization algorithm for vertical highway alignment development. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2022. DOI: 10.1111/mice.12814
15. Sablin S.Yu., Skrypnikov A.V., Vysotskaya I.A., Boltnev D.E., Bryukhovetsky A.N. Feasibility study of geometric elements of road surfaces. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2021; 14(1):(68):41-45. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_1_41 (rus.).
16. Afonichev D.N. Improvement of the calculation of the profile volume of earthworks in computer-aided design system. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2012; 75:419-430. (rus.).
17. Sushkov S.I., Bolotskykh L.V., Karataeva T.V. Improving the supply of road construction materials in the conditions of instability and large-scale news pricing. *High Technologies in the Construction Industry*. 2018; 1:13-18. (rus.).
18. Zemskov A.V., Fomicheva E.R., Klykov M.S. The analysis of approaches to determination of stocks of materials in the warehouse of the road-building organization. *Scientifically Technical and Economical Cooperation in Asia-Pacific Countries in the 21st Century*. 2016; 1:464-467. (rus.).
19. Wang J., Wang X., Shou W., Chong H.-Y., Guo J. Building information modeling-based integration of MEP layout designs and constructability. *Automation in Construction*. 2016; 61:134-146. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.10.003
20. Khalil I.G., Mohamed A., Smail Z. Building Information Modeling for rural road design: A case study. *2021 16th International Conference on Electronics Computer and Computation (ICECCO)*. 2021. DOI: 10.1109/ICECCO53203.2021.9663761

Received March 10, 2022.

Adopted in revised form on May 24, 2022.

Approved for publication on May 24, 2022.

BIONOTES: Olga A. Bezdelnikova — Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Technologies and Organization of Construction, Institute of Forestry, Mining and Construction Sciences; Petrozavodsk State University (PetrSU); 29 Lenin Avenue, Petrozavodsk, 185035, Russian Federation; ID RISC: 821944; olga402b@mail.ru;

Lubov V. Shepeleva — engineer of the production and technical of the Department of Production Management; **Kondopoga Road Repair and Construction Department**; 138 Soviet st., Kondopoga, 186225, Russian Federation; sigc1777@mail.ru.

Contribution of the authors: all the authors contributed to this article equivalently.

The authors declare that there is no conflict of interests.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список источников.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список источников указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициал*

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов.

Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы (\mathbf{a} , \mathbf{b} и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список источников и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках источников, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

СВЕДЕНИЯ О ВКЛАДЕ КАЖДОГО АВТОРА

Сведениям предшествуют слова «**Вклад авторов:**» (**Contribution of the authors:**). После фамилии и инициалов автора в краткой форме описывается его личный вклад в написание статьи (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т.д.).

Сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия указывают после всех данных о вкладе каждого автора.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список источников рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Список источников на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список источников на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка источников редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

Тип Статьи

Тип статьи — научная статья, обзорная статья, редакционная статья, дискуссионная статья, персоналии, редакторская заметка, рецензия на книгу, рецензия на статью, спектакль и т. п., краткое сообщение.

УДК 11111

DOI 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

Имя Отчество Фамилия¹, Имя Отчество Фамилия²...

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы первого автора; город, страна

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. См. **рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

Автор, ответственный за переписку: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

² Место работы первого автора; город, страна – на английском языке

**если авторов не более четырех, то необходимо указывать полные ФИО, от пяти авторов и более – допустимо использовать инициалы*

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

Corresponding author: Имя Отчество Фамилия, адрес электронной почты для связи – на английском языке

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке 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.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).
2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).
2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

В и о н о т е с: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

Вклад авторов:

Фамилия И.О. - описание личного вклада в написание статьи в краткой форме (идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста и т. д.).

Пример:

Артемяева С. С. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; участие в разработке учебных программ и их реализации; написание исходного текста; итоговые выводы. Митрохин В. В. – участие в разработке учебных программ и их реализации; доработка текста; итоговые выводы.

После «Информации об авторах» приводят сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов и детализацию такого конфликта в случае его наличия. Если в статье приводят данные о вкладе каждого автора, то сведения об отсутствии или наличии конфликта интересов указывают после них.

Пример:

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

(наименование банка получателя платежа)

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2022 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Извещение

Кассир

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736X29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

0 3 2 1 4 6 4 3 0 0 0 0 0 0 1 7 3 0 0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

БИК 0 0 4 5 2 5 9 8 8

(наименование банка получателя платежа)

КБК

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 3 0

ОКТМО

4 5 3 6 5 0 0 0

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь,
июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2022 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа)

(номер лицевого счета (код) плательщика)

Ф.И.О

плательщика _____

Адрес

плательщика _____

Сумма

платы

за

Сумма платежа 6 880 руб. 00 коп. услуги _____ руб. _____ коп.

Итого _____ руб. _____ коп. « _____ » _____ 20 _____ г.

С условиями приема указанной в платежном документе суммы, в т.ч. с суммой взимаемой платы за услуги банка, ознакомлен и согласен.

Подпись

плательщика _____

Квитанция

Кассир

Бланк для оплаты полугодовой подписки через редакцию (оплата в банке).

ВНИМАНИЕ!

Если вы оплатили подписку по форме ПД-4 в банке, то для своевременной отправки вам номеров журнала безотлагательно пришлите копию платежного документа и сообщите ваш адрес с почтовым индексом, Ф.И.О. на e-mail: podpiska@mgsu.ru.

Подписчики — работники НИУ МГСУ могут заполнить бланк на свое имя и обратиться в отдел распространения и развития Издательства МИСИ — МГСУ для оформления подписки.

Телефон: (495)287-49-14 (вн. 14-23), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

