

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 15 Выпуск 11/2020
Vol. 15 Issue 11/2020

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

**Том 15. Выпуск 11
2020**

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

Сквозной номер 146

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

**Volume 15. Issue 11
2020**

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

«Вестник МГСУ» — рецензируемый научно-технический журнал по строительству и архитектуре, целями которого являются 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: ric@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru
Тел.:	(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	29.11.2020.
Подписан в свет	31.11.2020.

Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 14,55. Тираж 100 экз. Заказ № 488

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, временно исполняющий обязанности ректора, 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 Эйнховена, Королевство Нидерландов (Голландия)

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

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

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

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

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

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

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

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 Лийяс, канд. экон. наук, профессор, Таллинский технический университет, Эстония

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

Светлана Васильевна Самченко, д-р техн. наук, проф., проф. кафедры Технологии вяжущих веществ и бетонов, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: *Анна Александровна Дядичева*

Корректор: *Любовь Владимировна Светличная*

Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*

Дизайн и верстка: *Александр Дмитриевич Федотов*

Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

Юрий Михайлович Баженов, акад. Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии вяжущих веществ и бетонов, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Евгений Иванович Пупырев, почетный член Российской академии архитектуры и строительных наук, д-р техн. наук, проф., консультант каф. гидравлики и гидротехнического строительства, НИУ МГСУ, Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK ^{MGSU}

Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company "ASV Publishing House", 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: ric@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	31.11.2020

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

Anver I. Burkhanov, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

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

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

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

Rolf Katzenbach, Doctor of Engineering, Professor, Technical University of Darmstadt, Federal Republic of Germany

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

Dmitry V. Kozlov, Moscow State University of civil engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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, Wrocław University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

Executive editor: *Anna A. Dyadicheva* **Corrector:** *Lyubov' V. Svetlichnaya*

Editor: *Tat'yana V. Berdnikova* **Layout:** *Aleksandr D. Fedotov*

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ekaterina V. Nezhnikova, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Yas'kova N. Yur'evna, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Moscow, Russian Federation

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

А.В. Васильева

**Московское и ленинградское влияние на композиционную организацию
жилых кварталов Ярославля в 1920–1930-е годы 1493**

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

З.Г. Тер-Мартirosян, Ю.В. Ванина

**Напряженно-деформированное состояние (НДС)
грунтового массива в четверти плоскости под воздействием полосовой нагрузки 1505**

Н.В. Федорова, Ву Нгок Туен, И.А. Яковенко

**Критерий прочности плосконапряженного железобетонного элемента
при особом воздействии 1513**

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В.Т. Ерофеев, В.В. Афонин, Т.Ф. Ельчищева, М.М. Зоткина, И.В. Ерофеева

Оценка солеобразования на цементных композитах по отсканированным изображениям 1523

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Б.Н. Житенев, А.Д. Гуринович, Д.Д. Сенчук

**Исследование сорбционных свойств брикетированного торфа
для очистки сточных вод от ионов кадмия, свинца и меди 1534**

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

М.Р. Петриченко, О.А. Соловьева

Соединение и разделение потоков в тройнике: метод Павловского 1546

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.А. Головесов, Г.Я. Рудакова, А.Г. Первов, Д.В. Стицов

**Выбор мембран и сервисных реагентов для мембранных установок,
применяемых для обработки подземных вод 1556**

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

С.А. Волков, Т.В. Хрипко

**Применение XML-схем при формировании структуры
информационной модели объектов капитального строительства 1570**

И.Е. Воронков, Н.В. Овинкин

Мировой опыт и перспективы разработки схем механизации строительства атомных электростанций . . 1584

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ. ДИСКУССИИ И РЕЦЕНЗИИ. ИНФОРМАЦИЯ

В.Т. Ерофеев

Рецензия на учебное пособие «Фасадные строительные материалы» (2020 год) 1597

Требования к оформлению научной статьи 1589

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Anna V. Vasileva

The influence of Moscow and Leningrad on the compositional organization of residential quarters in Yaroslavl in the 1920s and 1930s 1493

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

Zaven G. Ter-Martirosyan, Yuliya V. Vanina

The stress-strain state (SSS) of the soil body in the quarter plane subjected to the strip load 1505

Natalia V. Fedorova, Vu Ngoc Tuyen, Igor A. Yakovenko

Strength criterion for a plane stress reinforced concrete element under a special action 1513

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Vladimir T. Erofeev, Victor V. Afonin, Tatiana F. Elchishcheva, Marina M. Zotkina, Irina V. Erofeeva

Using scanned images to estimate salt formation on the surface of cement composites 1523

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Barys N. Zhytsianiou, Anatoli D. Hurynovich, Darya D. Sianchuk

A research into sorption properties of peat briquettes used to remove ions of cadmium, lead and copper from wastewaters 1534

HYDRAULICS. GEOTECHNIQUE. HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Mihail R. Petrichenko, Ol'ga A. Solov'yova

Merging and splitting flows in a tee: the Pavlovsky method 1546

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Vladimir A. Golovesov, Galina Ya. Rudakova, Alexei G. Pervov, Dmitry V. Spitsov

The choice of membranes and reagents designated for membrane systems used to treat ground water. 1556

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

Sergey A. Volkov, Tatiana V. Khripko

Using XML schemas to structure information models of capital construction facilities. 1570

Ivan E. Voronkov, Nikita V. Ovinkin

World experience and development prospects of mechanization scheme of nuclear power plants construction . . 1584

SHORT MESSAGES. DISCUSSIONS AND REVIEWS. INFORMATION

Vladimir T. Erofeev

The review of the "Building facade materials" (2020) study guide 1597

Requirements for research paper design 1589

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 15. Выпуск 11, 2020
Vestnik MGSSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 15, Issue 11, 2020

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА. РЕДАКЦИОННАЯ ПОЛИТИКА

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

Тематический охват соответствует научным специальностям:

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

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

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

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

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

AIMS AND SCOPE. EDITORIAL BOARD POLICY

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

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

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

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

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

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

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

объявляет о возможности подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора наук на темы: «Основы формирования ландшафтно-градостроительных систем Восточной Сибири», «Методологические основы транспортного моделирования городских агломераций», «Управление функционированием и развитием теплоснабжающих организаций», «Градостроительные основы развития сельскохозяйственных ландшафтов и поселений Нечерноземья».

Конкурсный отбор состоится на заседании Научно-технического совета НИУ МГСУ **15.12.2020 г. в 14.00.**

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

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

УДК 72.036:711.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1493-1504

Московское и ленинградское влияние на композиционную организацию жилых кварталов Ярославля в 1920–1930-е годы

А.В. Васильева

*филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» Научно-исследовательский институт теории
и истории архитектуры и градостроительства
(Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» НИИТИАГ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Показана актуальность изучения композиционных приемов в формировании жилой застройки провинциальных городов, связанная с развернувшейся программой реновации жилого фонда и реконструкции исторических центров городов. Несмотря на значительное количество работ, посвященных различным аспектам советского градостроительства и жилищной архитектуры рассматриваемого периода, локальные исследования, направленные на изучение застройки отдельных городов и сопоставление ее со столичной архитектурной практикой, востребованы как в отечественном, так и в зарубежном архитектуроведении.

Материалы и методы. Для выявления особенностей формирования композиционных приемов в организации жилой застройки Ярославля 1920–1930-х годов проводится ее поэтапное сопоставление с архитектурной практикой Москвы и Ленинграда того же периода.

Результаты. В эволюции жилой застройки Ярославля выделяется несколько этапов. Показано, что первый этап тяготел к московской архитектурной практике, характеризовавшейся несколько механистическим подходом к заполнению территории квартала. Второй этап, приходившийся на конец первой пятилетки, отличался упрощенным рисунком застройки и характером архитектуры. Следующий этап, связанный с задачами реконструкции центров городов, обусловил новую функцию жилищной архитектуры как ограничителя парадных городских пространств. На основании композиционного анализа принципов организации корпусов и архитектуры фасадов сделано заключение об усилении влияния ленинградской архитектурной школы. Последующие этапы связаны с формированием подходов к сохранению ценного исторического наследия в условиях задачи реконструкции центральных районов.

Выводы. Показаны особенности ярославской архитектуры на каждом этапе, сделаны выводы о степени и характере влияния московской и ленинградской архитектурных школ. Это позволяет говорить о наличии уникальных подходов к композиционной организации жилых кварталов, возводившихся как на свободных участках, так и в центральных районах города с ценным историческим наследием.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: жилищная архитектура, советская архитектура, Ярославль, жилой квартал, композиция, 1920–1930-е годы

Благодарности: Статья подготовлена в ходе исследования за счет средств государственной программы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» на 2013–2020 годы в рамках Плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН на 2020 г., тема 1.2.17.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Васильева А.В. Московское и ленинградское влияние на композиционную организацию жилых кварталов Ярославля в 1920–1930-е годы // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 11. С. 1493–1504. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1493-1504

The influence of Moscow and Leningrad on the compositional organization of residential quarters in Yaroslavl in the 1920s and 1930s

Anna V. Vasileva

*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 article shows the relevance of studying compositional techniques applied to residential areas in provincial cities in relation to the unfolding program of housing renovation and reconstruction of historical centres of cities. Despite a significant amount of research on various aspects of Soviet urban planning and domestic architecture of the period under review, the local research, focused on the development of particular cities in comparison with the architectural practice of the capital is in demand in both domestic and foreign architectural studies.

Materials and methods. The step-by-step comparison of the Yaroslavl domestic architecture, dating back to the 20ies and 30ies of the 20th century, is compared with the one of Moscow and Leningrad to identify the features characterizing the formation of compositional techniques applied to residential areas in Yaroslavl.

Results. The study highlights several stages in the evolution of residential development in Yaroslavl. It is shown that the first stage gravitated towards the Moscow practice characterized by a somewhat mechanistic approach to filling the territory of a quarter. The second stage, which dates back to the end of the first five-year plan, was characterized by a new function of domestic architecture as a limiting controller of central urban spaces. Further stages are focused on the task of developing approaches to the preservation of the valuable historical legacy in the context of reconstruction of central neighbourhoods.

Conclusions. The article shows the features of the Yaroslavl architecture at each stage, and conclusions are made about the extent and nature of influence produced by the Moscow and Leningrad schools. There are unique approaches to the compositional organization of residential quarters built both on vacant land plots and in the central neighbourhoods of the city that accommodates a valuable historical heritage.

KEYWORDS: domestic architecture, Soviet architecture, Yaroslavl, residential quarter, composition, 1920s and 1930s

Acknowledgments: The article was prepared in the course of the research project funded within the framework of the state program "Scientific and technological development of the Russian Federation" for 2013–2020 as part of the Plan for fundamental scientific research, co-developed by the Russian Ministry of construction and RAACS for 2020.

FOR CITATION: Vasileva A.V. The influence of Moscow and Leningrad on the compositional organization of residential quarters in Yaroslavl in the 1920s and 1930s. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(11):1493-1504. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1493-1504 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня по всей стране развернулась программа реконструкции ветхого жилья и благоустройства центральных частей городов. Но, увы, плачевное состояние значительной части жилого фонда, выстроенного в довоенный период и дошедшего до наших дней, его зачастую непростая строительная история, фрагментарные потери, практически неизбежные в жизни города, не позволяют легко разглядеть подлинную ценность и качество исторической городской среды. Если ценность застройки центральных районов Москвы и Санкт-Петербурга практически ни у кого не вызывает сомнений, то в провинциальных городах отношение к средовой застройке трудно назвать бережным. А среди этой застройки, которая и формирует уникальное лицо города, есть очень интересные объекты, которые несут в себе не только художественную и утилитарную ценность, но и свидетельствуют об эволюции градостроительной мысли, изменении подходов к организации жилой среды, понимании места жилищной архитектуры в структуре города. Изучение исторических архитектурных и градостроительных процессов в провинциальных городах сегодня имеет особую актуальность, так как оно может помочь избежать невосполнимой утраты ценных объектов.

В последние годы вопросы формирования застройки советских городов в межвоенный период начали постепенно входить в сферу научных интересов историков архитектуры и искусствоведов. Наибольшее количество трудов посвящено формированию московской жилищной архитектуры и подходам к организации застройки жилых кварталов (например, работы Ю.Л. Косенковой и Г.Н. Яковлевой [1], Ю.Д. Старостенко [2]). Наиболее полным трудом, посвященным застройке Ленинграда в рассматриваемый период, можно назвать книгу Б.М. Кирикова и М.С. Штиглиц [3].

Особенности формирования застройки провинциальных городов в последние годы рассмотрены в трудах многих ученых. Исследования Н.Н. Макаровой посвящены первым этапам строительства Магнитогорска [4], Е.А. Ахмедовой и Е.П. Борисовой — развитию архитектурно-планировочной структуры Самары [5], О.В. Шитина и С.А. Дектерева — влиянию принципов конструктивизма на жилищную архитектуру Нижнего Тагила [6], истории формирования застройки Томска посвящены работы Д.А. Беспаловой [7].

Ярославль, как крупный промышленный город с богатым историческим наследием, также заслужил отдельного внимания историков архитектуры. Особенности архитектурно-градостроительного процесса в Ярославле затронуты в работах Ю.Д. Старостенко [8] и наиболее полно и последовательно описаны в трудах Н.С. Сапрыкиной [9].

Региональная специфика процессов развития отдельных городов наиболее полно раскрывается в сопоставлении с общими тенденциями градостроительной теории и практики своего времени. Анализ градостроительных приемов эпохи авангарда в формировании жилой среды посвящены работы А.С. Улько, А.А. Аксеновой, И.М. Ястребовой [10], влияние приемов эпохи модернизма, которые напрямую вытекали из архитектуры авангарда, описано в трудах А. Еремеевой и Л. Ванатовской [11]. Организация процесса проектирования новых советских городов в рассматриваемый период освещается в работах М.С. Ильченко [12] и Н. Барыкиной, которая рассматривает влияние западных архитекторов на практику отечественного градостроительства [13]. Наши иностранные коллеги также интересуются формированием советских городов, в частности, Норильском [14].

Изучение архитектурно-градостроительного наследия середины XX в. востребовано и в западной науке и практике. Актуальность вопросов,

связанных с реконструкцией жилого фонда XX в., по всей Восточной Европе обусловило наличие научных трудов по этим вопросам западных исследователей. Формированию жилой застройки в городах Эстонии посвящены работы Г. Кунигаса [15] и С. Салтсона [16]. Исследование архитектуры жилых комплексов Таллина проводят П. Метспау и Д.Б. Хесс [17]. Влиянию Москвы на развитие чешской архитектуры посвящены статьи В. Хнидковой [18]. В фокусе большинства исследований архитектурно-градостроительных процессов, связанных с формированием жилой среды, находится послевоенный период. Сравнительный обзор послевоенных жилищных программ центрально- и восточноевропейских социалистических стран проводит М. Глендиннинг [19], показывая разнообразие организационных и архитектурных решений массового жилищного строительства в этих регионах. Сходные проблемы в практике Румынии описывает М. Маргинян [20]. Влиянию звезд западной архитектуры на градостроительную мысль в целом посвящены работы Л.П. Креспо, И.М. Робле [21].

Таким образом, отдельные аспекты формирования застройки отдельных советских городов как новостроек при развивающихся промышленных предприятиях, так и реконструируемых исторических кварталов, получили освещение в трудах отечественных и зарубежных специалистов. Изучение локальных особенностей развития городов в сопоставлении с глобальными процессами на текущий момент является передовым методологическим подходом в мировом архитектуроведении. Но исследований, посвященных эволюции планировочных подходов к организации жилой среды, изменению принципов размещения объектов нового строительства по территории города в соответствии с изменением государственных установок, трансформации роли и статуса объектов жилищного строительства, не проводилось. Наиболее ярким примером, способствующим раскрытию всех этих вопросов, представляется Ярославль, центральная часть которого в межвоенный период подверглась значительной реконструкции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для выявления особенностей формирования композиционных приемов в организации жилой застройки Ярославля на первом этапе был проведен сравнительный анализ жилых комплексов Москвы и Ленинграда в рассматриваемый период. Этот анализ позволил сформулировать особенности формирования застройки в столицах, определить своеобразные школы. Анализ объектов капитального жилищного строительства по хронологии их возведения позволил выявить трансформацию композиционных принципов организации застройки. Сопоставление объектов ярославской жилищной архитектуры

со столичными примерами дало возможность установить степень и характер влияния московской и ленинградской архитектурных школ на каждом этапе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сопоставительный анализ застройки Москвы и Ленинграда (именно в столицах в первую очередь было развернуто новое строительство) второй половины 1920-х годов показал, что в обоих городах были сформированы свои уникальные приемы ее организации. Московский подход характеризовался разделением выделяемого под новое муниципальное строительство и строительство рабочих кооперативов крупного участка на отдельные комплексы. Как правило, корпуса состояли из 3–4 секций, но в начале 1930-х годов встречались случаи увеличения протяженности корпусов до 7 секций.

В начальный период своего формирования жилые комплексы, которые занимали площадь в среднем 0,9...1,2 га, состояли из 2–3 корпусов с центрально-осевой композицией застройки (особенности формирования композиций московских жилых массивов рассмотрены в статье [22]). Эта композиция восходила к принципам пространственно-планировочной организации дореволюционных жилых комплексов с выделенным парадным проездом или парадным двором. При этом в основе каждого жилого корпуса лежала типовая секция, утверждавшаяся Моссоветом на текущий строительный сезон. К концу 1920-х годов наблюдалось доминирование двухквартирных секций с трехкомнатными жилыми ячейками. Но ориентация на реальное покомнатное заселение делала неактуальным разделение пространств квартир на жилое и парадное, что также подчеркивалось равнозначностью композиционного решения фасадов. Иными словами, композиционный прием выделения планировочной оси застройки сохранялся, но он уже никак не был связан с функциональной организацией жилищ.

Во второй половине 1920-х годов площадь участков для нового массового строительства увеличивалась. В среднем она составляла 1,5...2 га, но встречались и единичные случаи строительства на укрупненных участках площадью до 10 га. При этом корпуса состояли в среднем из 3–4 секций. Для обеспечения необходимой плотности застройки архитекторы создавали усложненные композиции из корпусов, формирующих уличный фронт застройки квартала и внутренних строений. Корпуса могли иметь усложненную Г- и Z-образную конфигурацию. Но начиная с 1931 г. возведение крупных жилых комплексов на периферийных городских территориях в Москве было приостановлено. Основные объемы нового строительства были сосредоточены в центральных районах и на крупных магистралях. Такой прием использовался для визуальной изоляции неблагоустроенных дворовых территорий и малоприменяемых

влекательной исторической застройки кварталов от новых формируемых парадных пространств улиц. Преобладал периметральный характер застройки участка с постановкой корпусов по красной линии улицы. При этом соседствующие здания, возведенные в один период, композиционно и стилистически зачастую никак не связывались друг с другом. Не реагировало новое московское строительство и на историческую застройку.

В Ленинграде уже в первых примерах послереволюционной практики жилищного строительства наблюдалась тенденция к созданию крупных градостроительных образований. Новая жилая застройка формировала целостную композицию не только одного застраиваемого квартала, но и значительного отрезка улицы, вдоль которой располагались соседствующие строительные участки. Протяженность фронта застройки составляла в среднем 300 м, а средняя площадь строительного участка составляла 4...6 га. Первые массивы состояли из корпусов из 3–4 жилых секций, но к началу 1930-х годов в среднем они включали в себя 7 секций, но могли насчитывать и до 25 секций.

В отличие от московской практики конфигурация строений была довольно проста. И площадь выделяемых под новое строительство участков, и кубатура отдельных корпусов в Ленинграде были существенно выше московских показателей. В основе жилых корпусов также лежали типовые двухквартирные секции для коммунального заселения, обеспечивающие композиционную равнозначность фасадов. В ленинградской практике эта равнозначность усиливалась одинаковой горизонтально вытянутой конфигурацией всех окон, вне зависимости от функции помещений. Жилые комплексы зачастую занимали площадь всего укрупненного квартала без его разделения на более мелкие строительные участки. Застройка разных масштабов складывалась в единую композицию благодаря протяженным композиционным осям, на которые умело нанизывались гармонизированные друг с другом элементы (подробнее о формировании композиционных особенностей жилой застройки Ленинграда см. статью автора [23]). Особое внимание архитекторы уделяли формированию композиционно целостного фронта застройки вдоль улицы. При этом свое композиционное значение имели и внутриквартальные проезды, дворовые пространства, создающие необходимую глубину всей композиции. Характерным для Ленинграда архитектурным элементом была арка, способствующая взаимопроникновению дворового и уличного пространств. В качестве акцента на протяженных монотонных корпусах использовался асимметрично расположенный треугольный или полукруглый эркер.

В 1925–1927 годах в Ярославле началось планирование первого капитального многоэтажного строительства. Первым кварталом многоэтажных квар-

тирных жилых домов является Бутусовский поселок, строительство которого велось в 1927–1929 годах (процесс его проектирования и строительства описан в трудах Н.С. Сапрыкиной [24]). Он состоит из равномерно расположенных по всей территории площадью 3,5 га небольших корпусов в форме каре (рис. 1). Оригинальных оград или элементов благоустройства не сохранилось (за исключением небольшой трансформаторной подстанции). Корпуса состоят из одинаковых двухквартирных секций со сквозным проветриванием. Жилые помещения имеют одинаковые площади и пропорции, что говорит об ориентации на коммунальное заселение. Между обращенными друг к другу корпусами образуется уютное дворовое пространство. Фронт улиц формируется протяженными фасадами одинаковых жилых корпусов с равномерными разрывами между ними. Композиционная замкнутость частей с созданием цепи небольших пространств между корпусами тяготеет к московской школе этого периода. Несмотря на равномерность и некоторую механистичность этой застройки, она все-таки имеет общую композиционную ось в виде озелененной аллеи, пересекающей поперек весь квартал (рис. 2). На эту ось раскрывается большинство дворовых пространств, имеющих достаточно высокую степень визуальной изоляции друг от друга. Такое стремление к созданию камерных дворовых пространств тяготеет к московской практике этого периода. При этом фасады имеют разное композиционное значение. На улицы и на центральную ось обращены пластически более богатые фасады с вертикалями остекления лестничных клеток, украшенные в широкую оштукатуренную раму, акцентированную балконами. Дворовые фасады, куда обращены окна кухонь, представляют собой равномерную сетку окон. Таким образом, функционально комплекс имеет разделение на парадный фронт и private дворовые пространства. Функционально-планировочная организация квартала соотносится с планировочными особенностями жилых секций.

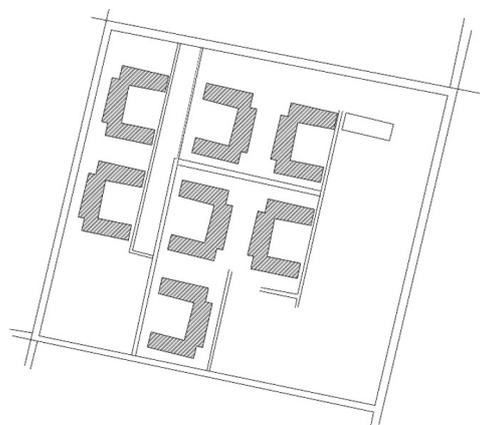


Рис. 1. Схема застройки Бутусовского поселка на рубеже 1920–1930-х годов

Fig. 1. Butusovsky settlement layout that dates back to the late 1920s and early 1930s



Рис. 2. Центральная планировочная ось Бутусовского поселка. Фотография автора, 2019 г.

Fig. 2. The main axis of Butusovskiy settlement. The photo was made by the author in 2019

Аналогичный принцип застройки использован и в небольшом квартале вдоль Большой Октябрьской улицы (его площадь составляет 1,2 га). Но жилые корпуса в форме каре не имеют замыкающих дворов зеркально расположенных частей. Они раскрываются на территорию ботанического сада Ярославского государственного педагогического университета (ЯГПУ) им. К.Д. Ушинского. Объединяющей дворовые пространства осью композиции опять выступает озелененное пространство. Фронт застройки улицы формируется протяженными фасадами. Подъезды также имеют два выхода, но вертикали лестничных клеток обращены в дворовое пространство. Вместе с особой вытянутой конфигурацией окон кухонь и небольшими квадратными окнами санузлов они создают более сложную композицию дворового фасада, чем в предыдущем примере. На улице обращены окна жилых комнат с балконами. Таким образом, и в этом примере применено функциональное разделение на парадное уличное и тихое, преимущественно с хозяйственной функцией, дворовое пространство.

Наиболее крупным и значимым жилым комплексом рубежа 1920–1930-х годов является частично реализованная застройка соцгорода ЯрРАК (история его создания также подробно описана в трудах Н.С. Сапрыкиной [25]), расположенная в самом начале проспекта Ленина. Эта застройка с фрагментарными вкраплениями более поздней застройки протянулась вдоль улицы на 1 км. Первые очереди строительства осуществлялись протяженными корпусами с квартирами двух типов: в боковых крыльях размещались обычные квартиры, а центральные части представляли собой общежития с коридорной системой. В угловых частях

находились просторные открытые кладовые для хранения скарба жильцов. Несмотря на новаторство функции и сочетание разных типов жилищ, корпуса имели традиционную центрально-симметричную композицию (рис. 3). Только разный ритм окон на фасаде выдает разные планировочные принципы их организации. Несмотря на новаторство градостроительной задачи, — создание образцового соцгорода, подходы к организации застройки достаточно традиционны: протяженные корпуса расставлены вдоль главной магистрали, центральная часть которой в наши дни представляет собой широкий бульвар. Западающие центральные части корпусов создают некую пульсацию уличного озелененного пространства (подчеркнем, что его центром опять является озелененное пространство). Геометрические центры сторон кварталов имеют свои композиционные акценты: здесь использована строчная постановка корпусов. Основные въезды в кварталы были забраны металлическими заборами с воротами на массивных кирпичных опорах (частично сохранились), что также дополнительно создавало визуальные акценты в застройке. Протяженные фасады уводят взгляд зрителя вглубь озелененного пространства квартала, в котором были запроектированы жилые корпуса, детские учреждения и элементы благоустройства. Но благоустройство территории кварталов первых очередей строительства произведено не было, поэтому жилые корпуса скрывали неприглядную изнанку дворов. Увеличение протяженности корпусов, попытка создания композиции протяженного фронта улицы, размещение детских объектов в центре жилых образований тяготеет к ленинградской практике начала 1930-х годов.



Рис. 3. Жилой дом ЯрПАК. Фотография автора, 2017 г.

Fig. 3. A residential building for YarPAK (Yaroslavl rubber and asbestos factory) employees. The photo was made by the author in 2017

Появились в начале 1930-х годов в Ярославле и небольшие кварталы строчной застройки, распространенной на всей территории СССР в этот период. Сохранившимся примером служит квартал на проспекте Октября д. 27–33 площадью 1 га. Дома были построены из крайне дешевых материалов, но своими деталями пытались имитировать «настоящую» архитектуру (декоративные лопатки и наличники окон сделаны из камышита) (рис. 4). На первый взгляд, корпуса поставлены равномерной строчкой. Но и здесь при внимательном рас-

смотрении можно выделить центральную композиционную ось, представляющую собой расширенное озелененное пространство, хотя архитектура жилых корпусов на него никак не реагирует: входы в подъезды всех корпусов расположены с одной стороны. Таким образом, приватное дворовое пространство для жителей, присутствующее во всех предыдущих примерах, здесь отсутствует.

В провинциальных городах, в том числе и в Ярославле, объемы капитального гражданского строительства в 1930-е годы по сравнению с име-



Рис. 4. Жилой дом в квартале строчной застройки на проспекте Октября. Фотография автора, 2019 г.

Fig. 4. A residential building in the ribbon development area, Oktyabrya avenue. The photo was made by the author in 2019

ющимися потребностями были совсем не велики. Поставленная перед всеми городами Советского Союза задача реконструкции центральных районов с созданием их парадных ансамблей вполне вписывалась в насущные потребности многих городов, так и не восстановленных от разрушений, произведенных в революцию и гражданскую войну. В соответствии с установками, в 1930-х годах основные объемы нового капитального строительства возводились в центральных районах. Производилось оно преимущественно на месте пустырей или ветхой малоценной застройки, на месте снесенных культовых объектов, так как строительство на месте эксплуатируемых жилых домов потребовало бы дополнительных затрат на расселение проживающих. При этом на окраинах города и в при заводских районах в 1930-е годы резко увеличились объемы так называемого «стандартного облегченного строительства» для расселения рабочих — кварталов типовых жилых корпусов, выстроенных из не дефицитных материалов (низкосортное дерево, дранка, утеплители из суррогатных материалов) без проведения инженерных коммуникаций. Подобное строительство производилось полностью за счет ведомств и предприятий, которые были заинтересованы в обеспечении рабочих жилой площадью, но не в повышении уровня их бытовых удобств.

Историк архитектуры Н.Ю. Васильев отмечает, что в середине 1930-х годов возникает достаточно устойчивая иерархия типов жилища, в которой учитываются социальный статус жильцов, положение дома в городе, качество строительства и благоустройства, размеры и удобство самих квартир [26]. Контраст облегченных типов жилищ и капитальных домов с щедро декорированными фасадами и квар-

тирами повышенного комфорта является характерной чертой периода первых пятилеток на всей территории СССР.

Разница подходов к жилищному строительству и к организации жилого квартала в начале и в середине 1930-х годов в Ярославле отчетливо видна на примере застройки проспекта Октября рядом с упомянутым кварталом строчной застройки. Практически напротив него находится один из первых в Ярославле домов для специалистов (проспект Октября, д. 34). Такая географическая близость усиливает контраст между объектами жилищного строительства первой и второй пятилетки. Этот жилой дом с трех сторон охватывает периметр занимаемого им квартала (площадью 0,9 га), что приравнивает его кубатуру к суммарной кубатуре жилых комплексов (дом состоит из 13 жилых секций). Центральная вогнутая часть (прием, характерный для ленинградской архитектуры первой половины 1930-х годов) формирует просторную площадь перед ней. Композиция всего квартала, в котором расположен этот объект, сформировавшаяся в несколько этапов уже в более поздний период, тем не менее полностью следует заданной логике периметральной протяженной застройки. Композиция фасадов строится на равномерном ритме ровных полуколонн и контрасте широких горизонтальных лент, визуальное связывающих это здание с соседним кварталом (рис. 5). Характерными частями этого здания являются и треугольные эркеры. Это — излюбленный прием ленинградского архитектора Г.А. Симонова, который он активно применял в своей практике рубежа 1920–1930-х годов [3]. Таким образом, этот пример восходит скорее к ленинградской школе.



Рис. 5. Первый жилой дом для специалистов. Фотография автора, 2019 г.

Fig. 5. The first residential building designed for specialists. The photo was made by the author in 2019

Участки под новое строительство в центральных районах выделялись вдоль красных линий улиц, преимущественно с угловой постановкой, что позволяло формировать сразу некий градостроительный узел. Но, если в Москве такой принцип позволял прятать неприглядную средовую застройку, не соответствующую столичному статусу, то в Ярославле он дал возможность сберечь уникальные храмы и окружающую их низкоэтажную малоплотную застройку, характерную для этого города. Если московские архитекторы стремились как можно плотнее закрыть внутреннее пространство квартала, то в Ярославле, наоборот, оставались разрывы между домами или устраивались арки, которые образовывали новые ракурсы на памятники. Новые дома были высотой 3–4 этажа, что позволяло формировать фронт застройки нового масштаба, что сразу выделяло архитектуру советского периода на фоне дореволюционного, но в то же время не создавало немасштабных диссонансов с исторической малоэтажной средой. Таким образом, если в Москве жилая застройка 1930-х годов играла роль парадной ширмы, то в Ярославле она скорее являлась новой надежной «коробочкой», в которой сохранялось ценное историческое содержание.

Хрестоматийным примером подхода к организации жилого квартала в центре Ярославля, где сохранились особо ценные памятники архитектуры, является комплекс жилых домов в Народном переулке, д. 2, возводившийся в 1936–1938 годах по проекту архитектора В.Е. Дубовского. Жилые дома бережно обходят жемчужину ярославской архитектуры — храм Николая Надеина. Оба корпуса имеют высоту три этажа с незначительным повышением угловой части плоским парапетом. Но корпус, расположенный ближе к волжской набережной, имеет более пластически проработанный декор и отделку фасада. С одной стороны, такое упрощение отделки позволяло экономить средства при сохранении композиционной целостности, а с другой — создать более органичное соседство с жилым домом начала 1930-х годов. Оба корпуса комплекса в торцевых частях имеют контрастные масштабы деталей жилого дома галереи высотой два этажа на мощных круглых опорах с тремя полуциркульными окнами, перекликающимися с арками галереи храма Николая Надеина. Входы в жилые подъезды расположены исключительно со стороны двора, что позволило создать более спокойную и равномерную композицию фасада-занавеса для осо-

бо ценного внутриквартального объекта. Таким образом, благодаря удачно найденным пропорциям и деталям, этот комплекс вписывается и в застройку 1930-х годов, и в историческую застройку этого места без создания перегруженных композиций. Композиционная ось комплекса раскрывает лучший вид на памятник, а используемые автором арки (особая роль арок в ярославской жилищной архитектуре показана в работах Н.С. Сапрыкиной [27]) создают интересные ракурсы, визуально объединяя старую и новую архитектуру. Иными словами, архитектор стремился к созданию целостного ансамбля, внутреннее пространство которого не менее ценно, чем его уличный фасад.

О стремлении архитекторов, работавших в Ярославле во второй половине 1930-х годов, к созданию целостных ансамблей жилых кварталов свидетельствуют последние довоенные очереди строительства соцгорода ЯрРАК. Жилой дом на ул. Советская, д. 74, был построен по проекту Н.В. Баранова (ленинградского архитектора) в 1938 г. (рис. 6). Он состоит из 8 жилых секций. Подъезды, как и в кварталах конца 1920-х годов, имели два входа, что способствует функциональному разделению квартала на парадный фасад и дворовое приватное пространство.

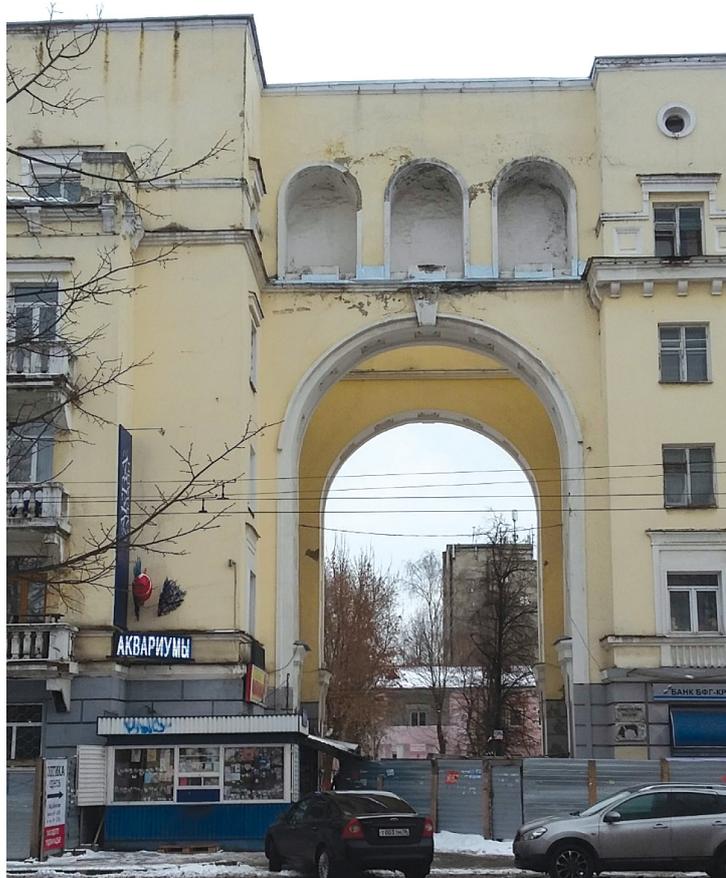


Рис. 6. Жилой дом для специалистов ЯрРАК. Фотография автора, 2017 г.

Fig. 6. A residential building designated for YarRAK (Yaroslavl rubber and asbestos factory) specialists. The photo was made by the author in 2017

Доминантой фасада является гигантская арка (характерный для ярославской архитектуры этого этапа элемент), раскрывающая внутреннее пространство квартала (его общая площадь составляет 2,55 га). Точно по оси этой арки находится детский сад для детей жителей этого дома с выступающей далеко вперед полуротондой-верандой. Соосное расположение ротонды и арки способствует связыванию комплекса из двух строений с разными функциями в единое композиционное целое. Этой связи способствуют и декоративные элементы — небольшие концентрические квадратные наличники. Таким образом, и в этом примере наблюдается стремление к композиционной и архитектурной взаимосвязи внутриквартального пространства и улицы — тенденции, характерной для ленинградской архитектурной практики тех лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В организации жилых кварталов в Ярославле в 1920–1930-х годах можно выделить три этапа:

- первый этап (1927–1929 годы) характеризовался организацией пространства жилого квартала путем механического расставления композиционно замкнутых комплексов с функционально выраженным парадным и дворовым пространством. Композиция квартала раскрывалась на центральное озелененное пространство, предназначенное, главным образом, для пешеходного движения. Сложные композиции кварталов из отдельных комплексов можно рассматривать как влияние московской практики этого времени;

- второй этап (1930–1934 годы) отличался упрощением характера застройки — периметральной или строчной. застройка раскрывается вглубь квартала, но не получает выраженного композици-

онного завершения. Подобная тенденция характерна для массовой застройки в обеих столицах и других городах СССР рассматриваемого периода;

- третий этап (1935–1940 годы) выделяется созданием целостных комплексов и ансамблей, переключаясь с исторической застройкой и окружением. Жилые корпуса значительно увеличиваются в длину и за счет роста количества составляющих их секций. застройка располагается преимущественно по периметру квартала, но при наличии главной композиционной оси, раскрывающейся на внутриквартальный объект. Стремление к организации взаимопроникновения парадного уличного и озелененного дворового пространства с акцентом в виде какого-либо объекта, удлинение жилых корпусов, стремление к включению квартала в целостный рисунок градостроительной ткани места можно однозначно рассматривать как влияние ленинградской практики рассматриваемого этапа.

Отличительной чертой ярославской практики было наличие четкой композиционной оси, которая представляла собой озелененное пространство для пешеходного движения. Применение в начале и конце рассматриваемого этапа планировочных решений жилых секций с двумя входами способствовало не только визуальному, но и функциональному разделению пространства квартала на парадное и приватное дворовое.

Таким образом, в особенностях формирования жилых кварталов в Ярославле на начальном этапе можно увидеть более существенное влияние московской практики, а к концу рассматриваемого периода — доминирующее воздействие ленинградской школы, но с большой долей местной специфики, обусловленной стремлением органичного встраивания новых объектов в сохранившуюся ценную историческую застройку.

ЛИТЕРАТУРА

1. Косенкова Ю.Л., Яковлева Г.Н. Градостроительные аспекты жилищного строительства в СССР: 1920–1950-е гг. // Массовое жилище как объект творчества. Роль социальной инженерии и художественных идей в проектировании жилой среды. Опыт XX и проблемы XXI века. 2015. С. 198–228.

2. Старостенко Ю.Д. Представление об ансамбле в советской архитектуре 1930-х гг.: теория и практика (на примере Москвы и Ленинграда) // Academia. Архитектура и строительство. 2016. № 2. С. 35–40.

3. Кириков Б.М., Штиглиц М.С. Архитектура ленинградского авангарда: путеводитель / под общ. ред. Б.М. Кирикова. 4-е изд., с изм. СПб. : Коло, 2018. 311 с.

4. Макарова Н.Н. Сталинская Магнитка: общие тенденции градостроительства (1929–1953) // Сибирские строители: события и судьбы : сб. ст. Всеросс. науч. конф. Курган : Курганский Дом печати, 2017. С. 426–441.

5. Ахмедова Е.А., Борисова Е.П. Развитие архитектурно-планировочной структуры города Самары в 1920–2000 годы // Архитектура и строительство России. 2016. № 4 (220). С. 12–21.

6. Штин О.В., Дектерев С.А. Конструктивизм в архитектуре жилища Нижнего Тагила // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2013. № 1. С. 59–65.

7. Беспалова Д.А. К истории изучения архитектурного наследия Томска // Вестник Томского государственного университета. Культуроло-

гия и искусствоведение. 2019. № 34. С. 234–240. DOI: 10.17223/2220836/34/24

8. *Старостенко Ю.Д.* Разработка и реализация проектов реконструкции городов СССР в 1930-е годы и судьба наследия на примере Нижнего Новгорода и Ярославля // *Архитектура. Строительство. Дизайн.* 2015. № 3 (80). С. 50–57.

9. *Сапрыкина Н.С.* Особенности развития архитектуры Ярославля в советский период времени // *Вестник гражданских инженеров.* 2006. № 3 (8). С. 16–20.

10. *Улько А.С., Аксенова А.А., Ястребова И.М.* Методы формирования жилой застройки на основе принципов отечественной архитектуры эпохи авангарда 1920–1930 годов // *Архитектура и современные информационные технологии.* 2019. № 1 (46). С. 148–159.

11. *Eremeeva A., Venatovskaya L.* Residential districts of soviet modernism: history and prospects for further development // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Urban Design and Planning.* 2018. Vol. 171. Issue 3. Pp. 118–132. DOI: 10.1680/jurdp.17.00019

12. *Ильченко М.С.* Незавершенный проект как форма восприятия советского градостроительства 1920–1930-х гг.: опыт социалистических городов // *Сибирские исторические исследования.* 2017. № 2. С. 56–79. DOI: 10.17223/2312461X/16/5

13. *Varykina N.* Transnational mobilities: Western European architects and planners in the Soviet industrial cities, 1928–1933 // *Planning Perspectives.* 2017. Vol. 32. Issue 3. Pp. 333–352. DOI: 10.1080/02665433.2017.1310629

14. *De Lille L.C.* Norilsk: architecture in the GULAG. Caucasian history of the Soviet Polar City // *Vingtieme Siecle-Revue d'Histoire.* 2019. Issue 143. Pp. 215–216.

15. *Kuningas H.* On the establishment of Estonia's monofunctional workers' settlements from the latter half of the 1930s to the early 1950 // *Tuna-Ajalookultuuri Ajakiri.* 2018. Issue 4. P. 68.

16. *Sultson S.* Estonian urbanism 1935–1955: the Soviet-era implementation of pre-war ambitions // *Planning Perspectives.* 2018. Vol. 33. Issue 3. Pp. 385–409. DOI: 10.1080/02665433.2017.1348977

17. *Metspalu P., Hess D.B.* Revisiting the role of architects in planning large-scale housing in the USSR: the birth of socialist residential districts in

Tallinn, Estonia, 1957–1979 // *Planning Perspectives.* 2018. Vol. 33. Issue 3. Pp. 335–361. DOI: 10.1080/02665433.2017.1348974

18. *Hnidkova V.* Visible and invisible Moscow: The vanguard of socialist realism in Czech architecture // *UMENI ART.* 2015. Vol. 63. Issue 6. Pp. 458–464.

19. *Glendinning M.* Mass housing and extensive urbanism in the Baltic Countries and Central/Eastern Europe: A comparative overview. The urban book series. 2019. Pp. 117–136. DOI: 10.1007/978-3-030-23392-1_1

20. *Marginean M.* Some discussions on functionalist housing and its economics in Romania by the late 1950s and early 1960s // *Studia Politica.* 2017. Vol. 17 (1). Pp. 73–84.

21. *Crespo L.P., Robles I.M.* Del campus industrial al campus tecnológico. Albert Kahn, Mies-Hilberseimer y Eero Saarinen // *Arquitetura Revista.* 2016. Vol. 12. Issue 1. Pp. 101–124. DOI: 10.4013/arq.2016.121.09

22. *Васильева А.В.* Жилой массив как самостоятельный вид жилой застройки первой трети XX века // *Культурное наследие России.* 2018. № 2. С. 59–65.

23. *Васильева А.В.* Композиционные приемы в организации жилых кварталов Ленинграда 1920–1930-х годов // *Наука, образование и экспериментальное проектирование. Труды МАРХИ : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 8–12 апреля 2019 г. М. : МАРХИ, 2019. С. 371–375.*

24. *Сапрыкина Н.С.* Первые жилые комплексы для рабочих Ярославля в конце 1920-х – начале 1930-х годов // *Социальные и гносеологические проблемы общества : сб. науч. тр. : Вып. 2. Ярославль : Рубеж, 2006. С. 292–297.*

25. *Сапрыкина Н.С.* «Соцгород Яррак» в Ярославле, этапы его формирования // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура.* 2006. № 6. С. 169–174.

26. *Васильев Н.Ю.* Эволюция типологии массового жилища в советской архитектуре межвоенного периода // *Массовое жилище как объект творчества. Роль социальной инженерии и художественных идей в проектировании жилой среды. Опыт XX и проблемы XXI века.* 2015. С. 110–121.

27. *Сапрыкина Н.С.* Архитектура Ярославля 1930-х годов. Жилые «дома с арками» // *Вестник гражданских инженеров.* 2007. № 1 (10). С. 9–14.

Поступила в редакцию 10 июля 2020 г.

Принята в доработанном виде 5 октября 2020 г.

Одобрена для публикации 28 октября 2020 г.

ОБ АВТОРЕ: Анна Владимировна Васильева — старший научный сотрудник; филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства (Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» НИИТИАГ); 111024, г. Москва, ул. Душинская, д. 9; РИНЦ ID: 812086; ResearcherID: J-7616-2017; niitag@yandex.ru.

REFERENCES

1. Kosenkova Yu.L., Yakovleva G.N. Urban planning aspects of housing construction in the USSR: 1920-1950. *Mass dwelling as an object of creativity. The role of social engineering and artistic ideas in the design of the living environment. Experience of XX and problems of XXI century.* 2015; 198-228. (rus.).
2. Starostenko Yu.D. The idea of an ensemble of soviet architecture in the 1930s: theory and practice (the example of Moscow and Leningrad). *Academia. Architecture and Construction.* 2016; 2:35-40. (rus.).
3. Kirikov B.M., Stieglitz M.S. *Leningrad avant-garde architecture: a guide* / ed. by B.M. Kirikov. 4th ed., rev. St. Petersburg, Kolo publ., 2018; 311. (rus.).
4. Makarova N. Stalin's Magnitogorsk: the general trends of urban development (1929-1953). *Siberian builders: events and destinies: collection of articles of the all-Russian scientific conference.* Kurgan, Kurgan Press House publ., 2017; 426-441. (rus.).
5. Akhmedova E., Borisova E. The development of Samara's city planning structure in 1920-2000. *Architecture and Construction of Russia.* 2016; 4(220):12-21. (rus.).
6. Shtin O., Dekterev S. Constructivism in the architecture of homes in Nizhny Tagil. *Akademicheskij vestnik Uralniiproekt RAASN.* 2013; 1:59-65. (rus.).
7. Bepalova D.A. To the history of studying of architectural heritage in Tomsk. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Kul'turologiya i iskusstvo-vedenie.* 2019; 34:234-240. DOI: 10.17223/2220836/34/24 (rus.).
8. Starostenko Yu.D. Development and implementation of projects for reconstruction of cities of the USSR in the 1930-ies and the fate of heritage by the example of Nizhny Novgorod and Yaroslavl. *Architecture, Construction, Design.* 2015; 3(80):50-57. (rus.).
9. Saprikina N.S. Features of development of Yaroslavl's architecture in the soviet period of time. *Bulletin of Civil Engineers.* 2006; 3(80):16-20. (rus.).
10. Ulko A., Aksenova A., Yastrebova I. Methods of residential buildings forming on the principles of the domestic avant-garde architecture of 1920-1930s. *Architecture and Modern Information Technologies.* 2019; 1(46):148-159. (rus.).
11. Ereemeeva A., Venatovskaya L. Residential districts of soviet modernism: history and prospects for further development. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Urban Design and Planning.* 2018; 171(3):118-132. DOI: 10.1680/jurdp.17.00019
12. Ilchenko M.S. Unfinished project as a way to conceive soviet urban planning in the 1920s and the 1930s: the case of socialist cities. *Sibirskie istoricheskie issledovaniya.* 2017; 2:56-79. DOI: 10.17223/2312461X/16/5 (rus.).
13. Barykina N. Transnational mobilities: Western European architects and planners in the Soviet industrial cities, 1928-1933. *Planning Perspectives.* 2017; 32(3):333-352. DOI: 10.1080/02665433.2017.1310629
14. De Lille L.C. Norilsk: architecture in the GULAG. Caucasian history of the Soviet Polar City. *Vingtieme Siecle-Revue d'Histoire.* 2019; 143:215-216.
15. Kuningas H. On the establishment of Estonia's monofunctional workers' settlements from the latter half of the 1930s to the early 1950s. *Tuna-Ajalookultuuri Ajakiri.* 2018; 4:68.
16. Sultson S. Estonian urbanism 1935–1955: the Soviet-era implementation of pre-war ambitions. *Planning Perspectives.* 2018; 33(3):385-409. DOI: 10.1080/02665433.2017.1348977
17. Metspalu P., Hess D.B. Revisiting the role of architects in planning large-scale housing in the USSR: the birth of socialist residential districts in Tallinn, Estonia, 1957–1979. *Planning Perspectives.* 2018; 33(3):335-361. DOI: 10.1080/02665433.2017.1348974
18. Hnidkova V. Visible and invisible Moscow: The vanguard of socialist realism in Czech architecture. *UMENI ART.* 2015; 63(6):458-464.
19. Glendinning M. *Mass Housing and Extensive Urbanism in the Baltic Countries and Central/Eastern Europe: A Comparative Overview.* The Urban Book Series, 2019; 117-136. DOI: 10.1007/978-3-030-23392-1_1
20. Marginean M. Some discussions on functionalist housing and its economics in Romania by the late 1950s and early 1960s. *Studia Politica.* 2017; 17(1):73-84.
21. Crespo L.P., Robles I.M. Del campus industrial al campus tecnológico. Albert Kahn, Mies-Hilberseimer y Eero Saarinen. *Arquitectura Revista.* 2016; 12(1):101-124. DOI: 10.4013/arq.2016.121.09
22. Vasileva A.V. Residential area as an independent type of housing in the first third of the twentieth century. *Cultural heritage of Russia.* 2018; 2:59-65. (rus.).
23. Vasileva A.V. Compositional techniques in the organization of residential quarters of Leningrad in the 1920-1930s. *Science, education and experimental design: proceedings of the international scientific and*

practical conference April 8-12, 2019. Moscow, 2019; 371-375. (rus.).

24. Saprikina N.S. The first residential complexes for workers in Yaroslavl in the late 1920s – early 1930s. *Social and gnoseological problems of society : collection of scientific works: Vol. 2*. Yaroslavl, Rubezh publ., 2006; 292-297. (rus.).

25. Saprikina N.S. “Yarrak Sotsgorod” in Yaroslavl and the stages of its formation. *VolgGASU Bulletin*. 2006; 6:169-174. (rus.).

26. Vasilev N.Yu. Evolution of the typology of mass housing in the Soviet architecture of the inter-war period. *The role of social engineering and artistic ideas in the design of the living environment. Experience of XX and problems of XXI century*. 2015; 110-121. (rus.).

27. Saprikina N.S. Yaroslavl's architecture of mid 1930s. Arched residential houses. *Bulletin of Civil Engineers*. 2007; 1(10):9-14. (rus.).

Received July 10, 2020.

Adopted in revised form on October 05, 2020.

Approved for publication on October 28, 2020.

BIONOTES: Anna V. Vasileva — senior 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 Dushinskaya st., Moscow, 111024, Russian Federation; ID RISC: 812086; ResearcherID: J-7616-2017; niitag@yandex.ru.

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

УДК 624.131.5

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1505-1512

Напряженно-деформированное состояние грунтового массива в четверти плоскости под воздействием полосовой нагрузки

З.Г. Тер-Мартirosян, Ю.В. Ванина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. При строительстве высотных зданий с развитой подземной частью, расположенной в глубоких котлованах, неизбежно возникает необходимость количественной оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтов за ограждением котлована с учетом взаимодействия с окружающей застройкой и условий контакта с ограждающей конструкцией. Рассматривается действие распределенной нагрузки $p = \text{const}$ на горизонтальном участке шириной $b = 2a$ на расстоянии $c < a$ от края стенки прямоугольного профиля, что вызывает неоднородное НДС в массиве грунта в форме четверти плоскости. Принимается, что вертикальная стенка закреплена распорными конструкциями, но допускаются вертикальные перемещения грунтов.

Материалы и методы. В основе аналитического решения задачи о действии распределенной нагрузки на горизонтальном участке массива грунта в форме четверти плоскости использовалось известное решение плоской задачи теории упругости для полупространства при действии нагрузки $p = \text{const}$, распределенной по полосе. Аналитическое решение получено при помощи программного комплекса (ПК) MathCAD, численное решение — в ПК PLAXIS 2D.

Результаты. Проведены аналитическое и численное исследования задачи о действии распределенной нагрузки на горизонтальном участке массива грунта в форме четверти плоскости. Выполнена сравнительная оценка результатов НДС и их анализ.

Выводы. Из анализа приведенных результатов поставленной задачи следует, что получена хорошая сходимость результатов аналитического и численного решений. Таким образом, дальнейшее развитие новых методов количественной оценки НДС массивов грунтов на основе известных теоретических решений является одной из основных задач современного проектирования оснований и фундаментов зданий и сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: НДС грунтового основания, четверть плоскости, задача Фламана, ограждение котлована, численное моделирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян З.Г., Ванина Ю.В. Напряженно-деформированное состояние грунтового массива в четверти плоскости под воздействием полосовой нагрузки // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 11. С. 1505–1512. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1505-1512

The stress-strain state of the soil body in the quarter plane subjected to the strip load

Zaven G. Ter-Martirosyan, Yuliya V. Vanina

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

ABSTRACT

Introduction. The construction of high-rise buildings, having elaborated substructures located inside deep excavations, entails a quantitative evaluation of the stress-strain state (SSS) of soils beyond the excavation wall with regard for the interaction with the surrounding built-up area and conditions of the contact with the enclosure structure. The paper analyzes the effect of distributed load $p = \text{const}$ over a horizontal area having width $b = 2a$ at the distance of $c < a$ from the edge of a rectangular profile wall, which causes a non-uniform stress-strain state in the soil body having the shape of a quarter plane. It is assumed that the vertical wall is fixed with sprung structures, although vertical displacement of soil is acceptable.

Materials and methods. The analytical solution to the problem of the effect of the distributed load on the horizontal soil body having the shape of a quarter plane is based on a well-known solution to the plane elastic problem designated for the half-space subjected to load $p = \text{const}$ distributed over a strip. MathCAD software (SW) was employed to obtain the analytical solution; PLAXIS 2D software was used to obtain the numerical solution.

Results. Analytical and numerical methods were applied to solve the problem of exposure of a horizontal soil body, having the shape of a quarter plane, to a distributed load. A comparative assessment and analysis of the stress strain state values were performed.

Conclusions. Analytical and numerical solutions demonstrate good convergence pursuant to the analysis of the results. Therefore, further development of new methods for the quantitative evaluation of the stress strain state of the soil body based on the existing theoretical solutions is one of the main challenges to be tackled in advanced design of beddings and foundations.

KEYWORDS: foundation soil, stress strain state, quarter plane, the Flamant problem, excavation wall, numerical simulation

FOR CITATION: Ter-Martirosyan Z.G., Vanina Yu.V. The stress-strain state of the soil body in the quarter plane subjected to the strip load. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(11):1505-1512. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1505-1512 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

При строительстве высотных зданий с развитой подземной частью, расположенной в глубоких котлованах, неизбежно возникает необходимость количественной оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтов за ограждением котлована с учетом взаимодействия с окружающей застройкой и условий контакта с ограждающей конструкцией. В ходе становления и дальнейшего развития теоретической и прикладной механики грунтов появились решения инженерных задач с использованием теории упругости. Многие из них на сегодняшний день остаются актуальными, так как на их основе возможно развитие новых аналитических решений нелинейной механики грунтов, позволяющих учитывать большой спектр факторов, формирующих (НДС) массивов грунтов. Кроме того, при точном аналитическом решении возможна проверка численного моделирования инженерной задачи, которое получило широкое применение в практике проектирования оснований и фундаментов зданий и сооружений.

Общезвестно, что механическая модель линейно-деформируемой среды¹ [1], основанная на теории упругости, получила самое широкое распространение в инженерной практике. Положения этой теории справедливы как базирующиеся на линейной зависимости между напряжениями и деформациями в упругой стадии (закон Гука). Н.А. Цытович отмечал, что применимость теории линейно-деформируемой среды возможна, если в грунтовом массиве под воздействием внешней нагрузки формируется НДС, соответствующее активному нагружению [2].

Одним из первых решений по оценке напряженного состояния при действии линейной нагрузки на поверхность полупространства является решение Фламана (1892 г.) [3]. Также известны задача Митчела (1902 г.) о действии полосовой равномерно распределенной нагрузки интенсивностью q , задача Буссинеска (1885 г.) для единичной силы P , действующей на линейно-деформируемое полупростран-

ство, задача Кельвина о единичной силе, приложенной к бесконечно длинному телу, и др.

В дальнейшем решения по оценке напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов под воздействием нагрузок дорабатывались и совершенствовались М.И. Горбуновым-Посадовым [4], Г.К. Клейном [5], Н.А. Цытовичем [2], Н.М. Герсевановым [6], Ф. Шлейхером [7], К.Е. Егоровым [8], С.П. Тимошенко [9], З.Г. Тер-Мартirosяном [10] и другими учеными [11, 12] с целью учета различных факторов, таких как характер распределения напряжений, жесткость и форма фундаментных конструкций и т.д. Зарубежными учеными [13–18, 10, 19–25] разрабатываются методики, основанные на обратных задачах нахождения напряжений в массивах грунтов при помощи полевых испытаний с использованием программных комплексов для численного моделирования задач.

На основе решения задачи Фламана приводятся постановка и решение прикладной задачи для количественной оценки НДС грунтового массива в четверти плоскости под воздействием нагрузки $p = \text{const}$, распределенной по полосе шириной $b = 2a$, нижняя граница массива опирается на несжимаемое основание. Для сравнительного анализа был произведен аналогичный расчет в ПК PLAXIS 2D для четверти плоскости с граничным условием на оси $z \ \varepsilon_x = 0, \ \sigma_x \neq 0$.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматривается действие распределенной нагрузки $p = \text{const}$ на горизонтальном участке шириной $b = 2a$ на расстоянии $c < a$ от края стен прямоугольного профиля, которая вызывает неоднородное НДС в массиве грунта в форме четверти плоскости. Принимается, что вертикальная стенка закреплена распорными конструкциями, но допускаются вертикальные перемещения грунтов (рис. 1, а).

Решение задачи о НДС грунтового массива в четверти плоскости под воздействием полосовой нагрузки связано с большими трудностями [11]. Вместе с тем, в первом приближении ее можно решить, используя принцип симметрично ориентированной нагрузки по аналогии с задачей о НДС упругого слоя толщиной d под действием нагруз-

¹ СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. М. : Минрегионразвития РФ, 2011.

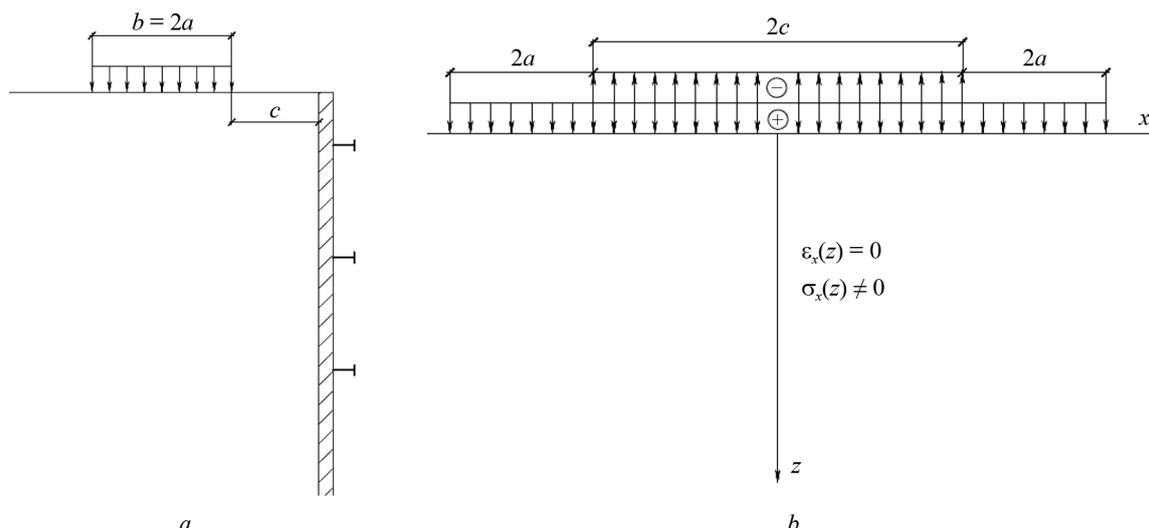


Рис. 1. Расчетная схема к определению НДС за ограждением глубокого котлована прямоугольного профиля (а) и эквивалентная расчетная схема (b)

Fig. 1. Computational pattern used to identify the stress strain state beyond the deep excavation having a rectangular profile (a) and an equivalent computational pattern (b)

ки $p = \text{const}$, распределенной по полосе шириной $b = 2a$, нижняя граница слоя опирается на несжимаемое основание. При приложении к слою толщиной $2d$ симметрично расположенных нагрузок $p = \text{const}$ по полосе шириной $b = 2a$, $z = \pm d$ решение задачи получается симметричным относительно $z = 0$, при этом на границе удовлетворяется условие: $\varepsilon_x = 0$, $\sigma_x \neq 0$ [10].

Если рассматриваемую нами задачу также можно привести к случаю симметрично расположенных полосовых нагрузок относительно вертикальной оси в полупространстве на расстоянии $c = 2a$ от оси z , очевидно, что при одновременном действии распределенных нагрузок $p = \text{const}$ внутри полуплоскости получим симметричное относительно оси z НДС, каждое из которых представляет НДС четверти плоскости с граничным условием на оси z : $\varepsilon_x = 0$, $\sigma_x \neq 0$.

Ниже приводятся постановка и решение задачи по количественной оценке НДС внутри четверти плоскости при действии распределенной нагрузки $p = \text{const} = 400$ кПа по полосе шириной $b = 2a$, при этом на оси z выполняется условие $\varepsilon_x = 0$, $\sigma_x \neq 0$. В этом случае задача сводится к случаю, когда на поверхности полуплоскости по полосе шириной $B = 2c + 4a$ действует распределенная нагрузка за вычетом действия распределенной нагрузки по полосе $2c$ (рис. 1, b).

Пусть на поверхности полуплоскости действует распределенная нагрузка $p = \text{const}$ по полосе шириной $B = 2c + 4a$ за вычетом действия распределенной нагрузки по полосе $2c$. Тогда итоговое НДС будет определяться как разность $\sigma_1(B, p) - \sigma_1(2c, p)$ и будет выполняться условие $\varepsilon_x = 0$, $\sigma_x \neq 0$ при $z > 0$.

В качестве исходного для решения поставленной задачи примем известное решение плоской задачи теории упругости для полупространства при действии нагрузки $p = \text{const}$, распределенной по полосе шириной $b = 2a$, т.е. имеем:

$$\sigma_x = \frac{p}{\pi} \left[\arctg \frac{a-x}{z} + \arctg \frac{a+x}{z} \right] + \frac{2apz(x^2 - z^2 + a^2)}{\pi \left[(x^2 - z^2 - a^2)^2 + 4a^2z^2 \right]}; \quad (1)$$

$$\sigma_z = \frac{p}{\pi} \left[\arctg \frac{a-x}{z} + \arctg \frac{a+x}{z} \right] - \frac{2apz(x^2 - z^2 + a^2)}{\pi \left[(x^2 - z^2 - a^2)^2 + 4a^2z^2 \right]}; \quad (2)$$

$$\tau_{xz} = \frac{p}{\pi} \frac{4axz^2}{\left[(x-a)^2 + z^2 \right] \left[(x+a)^2 + z^2 \right]}; \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{2p(1+\nu)}{3\pi} \left[\arctg \frac{a-x}{z} + \arctg \frac{a+x}{z} \right], \quad (4)$$

где $\sigma = (\sigma_x + \sigma_z)(1 + \nu)/3$.

Перемещение точек на поверхности полуплоскости можно определить по формуле (5):

$$w(x, 0) = \frac{2p(1-\nu^2)}{\pi E} \times \left[(x-a) \ln(x-a) - (x+a) \ln(x+a) + 2a \right]. \quad (5)$$

Для определения компонентов напряжений в соответствии с расчетной схемой (см. рис. 1, b) на основании системы уравнений достаточно вместо a принять $B/2$ при $+p$ и c при $-p$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Аналитический расчет при помощи ПК MathCAD позволил определить компоненты напряжений σ_x , σ_z , τ_{xz} по всей плоскости при $z > 0$ и $\pm x$. На рис. 2, а, 3, а и 4, а представлены изолинии компонент напряжений. Для сравнительного анализа был произведен аналогичный расчет в ПК PLAXIS 2D для четверти плоскости с граничным условием на оси $z \varepsilon_x = 0$, $\sigma_x \neq 0$. Результаты представлены на рис. 2, б; 3, б и 4, б.

Для определения степени приближения НДС в рассматриваемой области в качестве критерия рассматривается предложенный в работе [11] коэффициент:

$$\eta(x, z) = \frac{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2}{(\sigma_x - \sigma_z + 2c \cdot \text{ctg}\varphi)^2 \sin^2 \varphi} \quad (6)$$

При $\eta(x, z) > 1$ грунт вокруг точки $m(x, y)$ находится в устойчивом состоянии, при $\eta(x, z) < 1$ грунт вокруг точки $m(x, y)$ находится в неустойчивом состоянии.

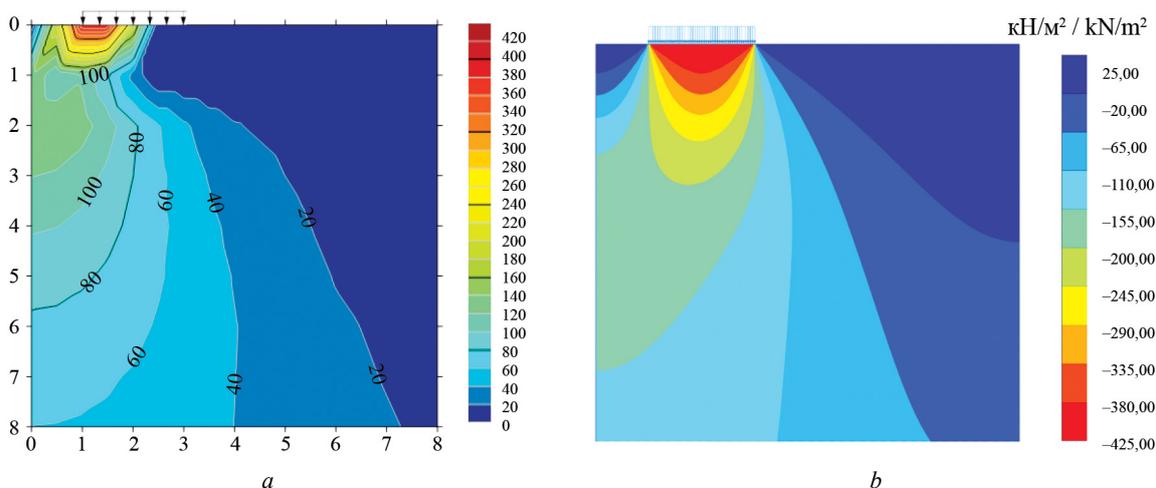


Рис. 2. Изолинии вертикальных напряжений σ_z : а — от действующей распределенной нагрузки $p = \text{const} = 400$ кПа по полосе шириной $B = c + 2a$ за вычетом действия распределенной нагрузки по полосе c ; б — результаты численного моделирования в PLAXIS 2D

Fig. 2. Isolines of vertical stresses σ_z : а — generated by actual distributed load $p = \text{const} = 400$ kPa along the strip that has width $B = c + 2a$ net of the effect of the load distributed over strip c ; б — results of the numerical simulation in PLAXIS 2D

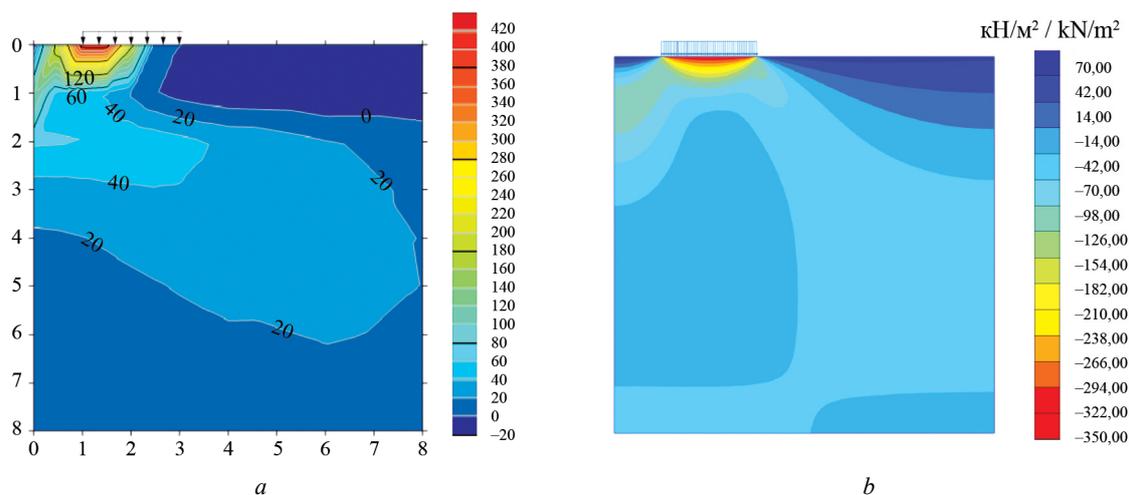


Рис. 3. Изолинии горизонтальных напряжений σ_x : а — от действующей распределенной нагрузки $p = \text{const} = 400$ кПа по полосе шириной $B = c + 2a$ за вычетом действия распределенной нагрузки по полосе c ; б — результаты численного моделирования в PLAXIS 2D

Fig. 3. Isolines of horizontal stresses σ_x : а — generated by actual distributed load $p = \text{const} = 400$ kPa along the strip having width $B = c + 2a$ net of the effect of the load distributed over strip c ; б — results of the numerical simulation in PLAXIS 2D

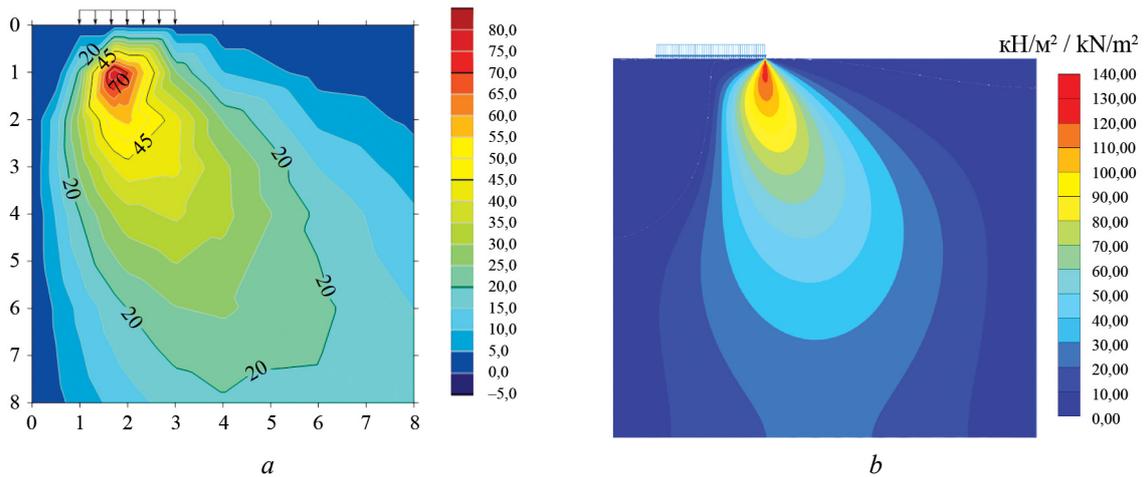


Рис. 4. Изолинии касательных напряжений τ_{xz} : *a* — от действующей распределенной нагрузки $p = \text{const} = 400$ кПа по полосе шириной $B = c + 2a$ за вычетом действия распределенной нагрузки по полосе $2c$; *b* — результаты численного моделирования в PLAXIS 2D

Fig. 4. Isolines of shear stresses τ_{xz} : *a* — generated by actual distributed load $p = \text{const} = 400$ kPa along the strip having width $B = c + 2a$ net of the effect of the load distributed over strip c ; *b* — results of the numerical simulation in PLAXIS 2D

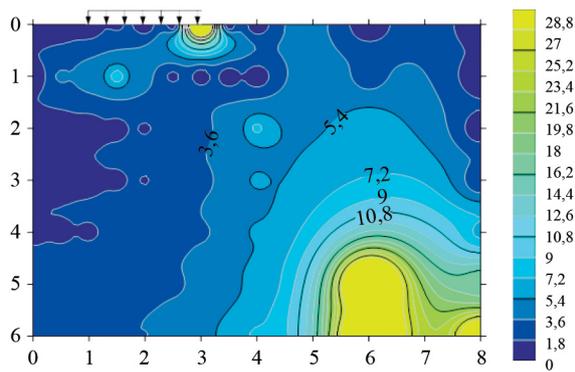


Рис. 5. Изолинии коэффициента $\eta(x, z)$

Fig. 5. Coefficient $\eta(x, z)$ isolines

Из анализа приведенных результатов аналитического решения поставленной задачи следует, что на оси z при отсутствии горизонтальных перемещений возникают значительные вертикальные и горизонтальные напряжения в пределах 150...180 кПа. При $x = 0$ — касательные напряжения $\tau_{xz} = 0$. По изолиниям коэффициента $\eta_{\text{пр}}$ можно сделать вывод, что области предельного состояния образуются при приближении к $x = 0$.

В соответствии с поставленной эквивалентной задачей эпюра осадки поверхности четверти плоскости, рассчитанной по формуле (5), представлена на рис. 6.

Эпюра перемещения точек на поверхности четверти плоскости имеет вид параболы.

Таким образом, получена хорошая сходимость аналитического решения на основе решения Фламана с численным моделированием. Характер распространения напряжений имеет одинаковое

распространение по глубине. Разница в значениях напряжений обусловлена учетом коэффициента Пуассона в линейно-упругой модели в ПК PLAXIS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщая полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- 1) из анализа приведенных результатов аналитического решения поставленной задачи следует, что на оси z при отсутствии горизонтальных перемещений возникают значительные вертикальные и горизонтальные напряжения в пределах 150...180 кПа. При $x = 0$ — касательные напряжения $\tau_{xz} = 0$. По изо-

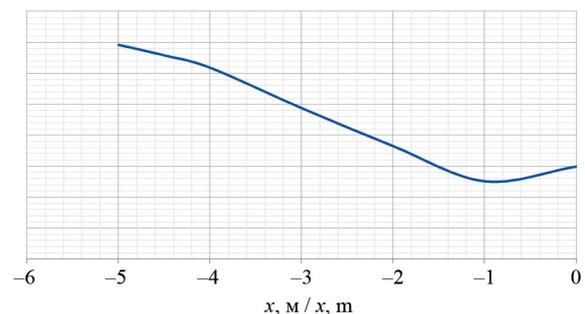


Рис. 6. Эпюра перемещения точек на поверхности четверти плоскости от действующей распределенной нагрузки $p = \text{const}$ по полосе шириной $B = c + a$ за вычетом действия распределенной нагрузки по полосе $2c$

Fig. 6. The profile of displacement of points over the surface of the quarter plane caused by actual distributed load $p = \text{const}$ along the strip having width $B = c + a$ net of the effect of the load distributed over strip $2c$

линиям коэффициента $\eta_{пр}$ можно сделать вывод, что области предельного состояния образуются при приближении к $x = 0$. Эпюра перемещения точек на поверхности четверти плоскости имеет вид параболы;

2) получена удовлетворительная сходимости аналитического решения на основе решения Фламанна с численным моделированием. Характер распространения напряжений имеет одинаковое распространение по глубине;

3) при проектировании котлованов зданий и сооружений можно, пользуясь данным решением, по-

лучить изополя напряжений при приложении распределенной нагрузки, например, от находящегося рядом строительного крана или складированных материалов;

4) разработка и усовершенствование методов количественной оценки НДС оснований и фундаментов близрасположенной застройки является важной прикладной задачей современного проектирования оснований и фундаментов зданий и сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильичев В.А. и др. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. М. : Изд-во АСВ, 2016. 1024 с.
2. Цытович Н.А. Механика грунтов. М. : Госстройиздат, 1963. 636 с.
3. Flamant A. Sur la répartition des pressions dans un solide rectangulaire chargé transversalement // *Compte. Rendu. Acad. Sci.* 1892. Vol. 114. Pp. 1465–1468.
4. Горбунов-Посадов М.И., Шехтер О.Я., Кофман В.А. Давление грунта на жесткий заглубленный фундамент и свободные деформации котлована // *Труды НИИ оснований и фундаментов*. М. : Гостройиздат, 1954. № 24.
5. Клейн Г.К. Учет неоднородности, разрывности деформаций и других механических свойств грунта при расчете сооружений на сплошном основании // *Сб. тр. МИСИ им. В.В. Куйбышева*. М. : Госстройиздат, 1956. № 14. С. 168–180.
6. Герсеванов И.М., Мачерет Я.А. К вопросу о бесконечно длинной балке на упругой почве, нагруженной силой // *Гидротехническое строительство*. 1935. № 10. С. 15–23.
7. Schleicher F. Zur theorie des baugrundes // *Bauingenieur*. 1926. Issue 7. P. 931.
8. Егоров К.Е. О деформации основания конечной толщины // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1961. № 1.
9. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М. : Наука, 1975. 576 с.
10. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. М. : АСВ, 2009. 551 с.
11. Караулов А.М., Королев К.В., Галтер Д.С. Предельное давление круглого штампа на основание в стесненных условиях // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2018. № 12 (720). С. 23–30.
12. Nguyen N.H.T., Vui H., Nguyen G.D. An approach to calculating large strain accumulation for discrete element simulations of granular media // *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. 2020. Vol. 44. Issue 11. Pp. 1525–1547. DOI: 10.1002/nag.3076
13. Brown E.T., Hoek E. Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1978. Vol. 15. Issue 4. Pp. 211–215. DOI: 10.1016/0148-9062(78)91227-5
14. Guerra C., Fischer K., Henk A. Stress prediction using 1D and 3D geomechanical models of a tight gas reservoir — A case study from the Lower Magdalena Valley Basin, Colombia // *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2019. Vol. 19. P. 100113. DOI: 10.1016/j.gete.2019.01.002
15. Fan H., Li S., Feng X.-T., Zhu X. A high-efficiency 3D boundary element method for estimating the stress/displacement field induced by complex fracture networks // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020. Vol. 187. P. 106815. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106815
16. Khademian Z., Shahriar K., Nik M.G. Developing an algorithm to estimate in situ stresses using a hybrid numerical method based on local stress measurement // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2012. Vol. 55. Pp. 80–85. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.05.019
17. Li G., Mizuta Y., Ishida T., Li H., Nakama S., Sato T. Stress field determination from local stress measurements by numerical modelling // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2009. Vol. 46. Issue 1. Pp. 138–147. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.07.009
18. Pei Q., Ding X., Liu Y., Lu B., Huang S., Fu J. Optimized back analysis method for stress determination based on identification of local stress measurements and its application // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2019. Vol. 78. Issue 1. Pp. 375–396. DOI: 10.1007/s10064-017-1118-0
19. Ильичев В.А. Плоская задача о штампе на упругом основании с учетом технологии его возведения // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2008. № 4. С. 12–16.

20. Королев К.В., Караулов А.М. Аналитическое решение задачи о предельном давлении на весомое сыпучее основание при больших нагрузках // Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции: сб. тр. науч.-техн. конф. 2010. 404 с.

21. Парамонов В.Н. Метод конечных элементов при решении нелинейных задач геотехники. СПб. : Геореконструкция, 2012. 262 с.

22. Cui X.-F., Xie F.-R. Preliminary research to determine stress districts from focal mechanism solutions in Southwest China and its adjacent area // *Acta Seismologica Sinica*. 1999. Vol. 12. Issue 5. Pp. 562–572. DOI: 10.1007/s11589-999-0056-8

23. Karaulov A.M., Korolev K.V. A static solution for the problem of the stability of a smooth freestanding sheet pile wall // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017. Vol. 54. Issue 4. Pp. 211–215. DOI: 10.1007/s11204-017-9460-6

24. Llorens M.-G. Stress and strain evolution during single-layer folding under pure and simple shear // *Journal of Structural Geology*. 2019. Vol. 126. Pp. 245–257. DOI: 10.1016/j.jsg.2019.06.009

25. Kudriavtcev S.A., Paramonovi V.N., Kazharski A.V., Goncharova E.D. Calculated evaluation of shoring of deep excavation in the restrained urban conditions (Khabarovsk, Russia) // *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2016. Vol. 2. Issue 79. Pp. 2722–2725. DOI: 10.3208/jgsssp.tc305-10

Поступила в редакцию 7 августа 2020 г.

Принята в доработанном виде 25 августа 2020 г.

Одобрена для публикации 08 сентября 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Завен Григорьевич Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, профессор кафедры механики грунтов и геотехники, почетный член Российской академии архитектуры и строительных наук, главный научный сотрудник научно-образовательного центра «Геотехника»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 496327; Ter-MartirosianAZ@mgsu.ru;

Юлия Викторовна Ванина — аспирант кафедры механики грунтов и геотехники; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 791344; yuli.julles@gmail.com.

REFERENCES

1. Plyichev V.A. et al. *Handbook of geotechnics. Bases, foundations and underground structures* / ed. V.A. Plyichev and R.A. Mangusheva. Moscow, Publishing house ASV, 2016; 1024. (rus.).

2. Tsytoich N.A. *Soil mechanics*. Moscow, Gosstroyizdat, 1963.636. (rus.).

3. Flamant A. Sur la répartition des pressions dans un solide rectangulaire chargé transversalement. *Compte. Rendu. Acad. Sci.* 1892; 114:1465-1468.

4. Gorbunov-Posadov M.I., Shekhter O.Ya., Kofman V.A. Soil pressure on a hard buried foundation and free deformations of the excavation. *Proceedings of the Research Institute of Foundations and Foundations*. Moscow, Gosstroyizdat, 1954; 24. (rus.).

5. Klein G.K. Consideration of heterogeneity, discontinuity of deformations and other mechanical properties of soil when calculating structures on a solid foundation. *Proceedings Moscow Civil Engineering Institute named after V.V. Kuibyshev*. Moscow, Gosstroyizdat, 1956; 14:168-180. (rus.).

6. Gersevanov I.M., Macheret Ya.A. On the question of an infinitely long beam on an elastic soil loaded with a force. *Hydrotechnical Construction*. 1935; 10:15-23. (rus.).

7. Schleicher F. Zur theorie des baugrundes. *Bauingenieur*. 1926; 7:931.

8. Egorov K.E. On the deformation of the base of finite thickness. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1961; 1. (rus.).

9. Timoshenko S.P., Goodyer J. *Theory of elasticity*. Moscow, Nauka, 1975; 576. (rus.).

10. Ter-Martirosyan Z.G. *Soil mechanics*. Moscow, ASV, 2009; 551. (rus.).

11. Korolev K.V., Karaulov A.M. Analytical solution of the problem of the ultimate pressure on a weighty loose foundation at high loads. *Actual problems of geotechnics in solving complex problems of new construction and reconstruction: collection of proceedings of the scientific and technical conference*. 2010; 404. (rus.).

12. Nguyen N.H.T., Bui H., Nguyen G.D. An approach to calculating large strain accumulation for discrete element simulations of granular media. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. 2020; 44(11):1525-1547. DOI: 10.1002/nag.3076

13. Brown E.T., Hoek E. Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sci-*

ences & Geomechanics Abstracts. 1978; 15(4):211-215. DOI: 10.1016/0148-9062(78)91227-5

14. Guerra C., Fischer K., Henk A. Stress prediction using 1D and 3D geomechanical models of a tight gas reservoir — A case study from the Lower Magdalena Valley Basin, Colombia. *Geomechanics for Energy and the Environment*. 2019; 19:100113. DOI: 10.1016/j.gete.2019.01.002

15. Fan H., Li S., Feng X.-T., Zhu X. A high-efficiency 3D boundary element method for estimating the stress/displacement field induced by complex fracture networks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020; 187:106815. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106815

16. Khademian Z., Shahriar K., Nik M.G. Developing an algorithm to estimate in situ stresses using a hybrid numerical method based on local stress measurement. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2012; 55:80-85. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.05.019

17. Li G., Mizuta Y., Ishida T., Li H., Nakama S., Sato T. Stress field determination from local stress measurements by numerical modelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2009; 46(1):138-147. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.07.009

18. Pei Q., Ding X., Liu Y., Lu B., Huang S., Fu J. Optimized back analysis method for stress determination based on identification of local stress measurements and its application. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2019; 78(1):375-396. DOI: 10.1007/s10064-017-1118-0

19. Il'ichev V.A. Plane problem of a footing on an elastic bed with consideration of its installation. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2008; 4:12-16. (rus.).

20. Karaulov A.M., Korolev K.V., Galter D.S. Limiting pressure of the round stamp upon the basis in the constrained conditions. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2018; 12(720):23-30. (rus.).

21. Paramonov V.N. *The finite element method for solving nonlinear problems in geotechnics*. St. Petersburg, Georeconstruction, 2012; 262. (rus.).

22. Cui X.-F., Xie F.-R. Preliminary research to determine stress districts from focal mechanism solutions in Southwest China and its adjacent area. *Acta Seismologica Sinica*. 1999; 12(5):562-572. DOI: 10.1007/s11589-999-0056-8

23. Karaulov A.M., Korolev K.V. A static solution for the problem of the stability of a smooth freestanding sheet pile wall. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017; 54(4):211-215. DOI: 10.1007/s11204-017-9460-6

24. Llorens M.-G. Stress and strain evolution during single-layer folding under pure and simple shear. *Journal of Structural Geology*. 2019; 126:245-257. DOI: 10.1016/j.jsg.2019.06.009

25. Kudriavtcev S.A., Paramonovi V.N., Kazharski A.V., Goncharova E.D. Calculated evaluation of shoring of deep excavation in the restrained urban conditions (Khabarovsk, Russia). *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2016; 2(79):2722-2725. DOI: 10.3208/jgssp.tc305-10

Received August 7, 2020.

Adopted in revised form on August 25, 2020.

Approved for publication on September 08, 2020.

B I O N O T E S: **Zaven G. Ter-Martirosyan** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Soil Mechanics and Geotechnics, Main scientific researcher of Research and Education Center “Geotechnics”, Academician of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS); **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 496327; Ter-MartirosianAZ@mgsu.ru;

Yuliya V. Vanina — postgraduate of Department of Soil Mechanics and Geotechnics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 791344; yuli.julles@gmail.com.

Критерий прочности плоскотяженногя железобетонного элемента при особом воздействии

Н.В. Федорова¹, Ву Нгюк Туен², И.А. Яковенко³

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

² *Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ); г. Курск, Россия;*

³ *Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины (НУБиП Украины); г. Киев, Украина*

АННОТАЦИЯ

Введение. Решение задач, связанных с проблемой защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения и минимизацией ресурсов на эту защиту, приобретает все большую актуальность. В многих странах, включая Россию, обеспечение такой защиты находится в рамках требований национальных нормативных документов и, следовательно, исследования, направленные на разработку эффективных способов защиты конструктивных систем от прогрессирующего обрушения при особых воздействиях, очень важны. Необходимо сформулировать эффективные критерии прочности таких анизотропных материалов, как железобетон, для расчета плоскотяженных железобетонных конструкций при их внезапной структурной перестройке, вызванной удалением одного из несущих элементов.

Материалы и методы. Предложен вариант обобщения теории пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева на случай режимного нагружения железобетонного плоскотяженного армированного железобетонного элемента. В качестве основной гипотезы принято условие о возможности обобщения критерия прочности теории пластичности бетона и железобетона при статическом нагружении на режимное статико-динамическое нагружение железобетона. Представлен алгоритм приближенного метода решения данной задачи, позволяющий анализировать рассматриваемое напряженно-деформированное состояние плоскотяженных железобетонных элементов.

Результаты. Численным анализом полученного решения в сопоставлении с результатами экспериментальных исследований выполнена оценка построенного критерия прочности железобетонных элементов, расположенных в зоне примыкания колонны к ригелю монолитной железобетонной рамы, при внезапной структурной перестройке конструктивной системы. Установлено, что качественный характер картины разрушения исследуемой зоны, полученный в опытах, соответствует картине разрушения, установленной расчетом с использованием предложенного критерия.

Выводы. Построенный на основе теории пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева вариант критерия прочности железобетона для режимного нагружения плоскотяженного железобетонного элемента и алгоритм его реализации могут быть применены для анализа особого предельного состояния железобетонных элементов конструктивных систем каркасов зданий и сооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: критерий прочности, плоское напряженное состояние, железобетон, теории пластичности, живучесть, внезапное удаление колонны, прогрессирующее обрушение, статико-динамическое нагружение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Федорова Н.В., Ву Нгюк Туен, Яковенко И.А. Критерий прочности плоскотяженного железобетонного элемента при особом воздействии // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 11. С. 1513–1522. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1513-1522

Strength criterion for a plane stress reinforced concrete element under a special action

Natalia V. Fedorova¹, Vu Ngoc Tuyen², Igor A. Yakovenko³

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

² *Southwest State University (SWSU); Kursk, Russian Federation;*

³ *National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (NUBiP Ukraine); Kiev, Ukraine*

ABSTRACT

Introduction. Problem solving focused on the protection of buildings and structures from progressive collapse and minimization of resources, needed for this purpose, is becoming increasingly important. In many countries, including Russia, this type of protection is incorporated into national regulatory documents, and, therefore, any research, aimed at developing effective ways to protect structural systems from progressive collapse under special actions, is particularly relevant. In this regard, the present article aims to formulate effective strength criteria for such anisotropic materials as reinforced concrete to analyze plane stressed reinforced concrete structures exposed to sudden structural transformations caused by the removal of one of bearing elements.

Materials and methods. To solve this problem, a variant of the generalized theory of plasticity of concrete and reinforced concrete, developed by G.A. Geniev, is proposed for application to the case of variable loading of a plane stressed reinforced

concrete element. The acceptability of generalization of the strength criterion, pursuant to the theory of plasticity of concrete and reinforced concrete under static loading, and the applicability of this criterion to variable static-dynamic loading of reinforced concrete are used as the main hypothesis. An algorithm of an approximate method is presented as a solution to this problem; it allows to analyze the considered stress-strain state of plane stressed reinforced concrete elements.

Results. The numerical analysis of the obtained solution, compared with the results of the experimental studies, was used to evaluate the designed strength criterion for reinforced concrete elements located in the area where the column is connected to the girder of a monolithic reinforced concrete frame in case of a sudden restructuring of a structural system. It is found out that the qualitative nature of the destruction pattern of the area under research, obtained in experiments, corresponds to the destruction pattern, identified by virtue of the analysis performed using the proposed criterion.

Conclusions. The variant of the reinforced concrete strength criterion designated for the variable loading of a plane stressed reinforced concrete element and an algorithm for its implementation, based on the theory of plasticity of concrete and reinforced concrete developed by G.A. Geniev, is applicable to the analysis of a special limit state of reinforced concrete elements of structural systems of frames of buildings and structures.

KEYWORDS: strength criterion, plane stress state, reinforced concrete, theory of plasticity, survivability, sudden column removal scenario, progressive collapse, static dynamic loading

FOR CITATION: Fedorova N.V., Vu Ngoc Tuyen, Yakovenko I.A. Strength criterion for a plane stress reinforced concrete element under a special action. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(11):1513-1522. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1513-1522 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В связи с необходимостью решения проблемы защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения, что предусмотрено требованиями нормативных документов нового поколения различных стран, в России и за рубежом проводятся исследования и разрабатываются различные предложения. Исследования направлены на решение задач живучести физически и конструктивно нелинейных систем [1–5], задач по определению величины за-проектных воздействий на конструкции, по определению напряженно-деформированного состояния (НДС) в элементах конструктивных систем при приложении этих нагрузок [6–11], а также по экспериментальному выявлению параметров статико-динамического деформирования конструкций при таких режимах нагружения [12–17] и др. К этой тематике относится и поиск эффективных способов защиты зданий и сооружений, минимизирующих материалоемкость и стоимость такой защиты [18–21].

В ряду новых задач рассматриваемой проблемы стоят и вопросы формулировки критериев несущей способности конструктивных систем при особых воздействиях. Для железобетонных конструкций особенно актуальным является определение критериев несущей способности сложно напряженных элементов, испытывающих неодноосное НДС. Достоверность критерия оценки несущей способности таких конструкций в определяющей степени зависит от достоверности принятой расчетной модели деформирования сечений таких элементов. Достаточно общей и удобной для практической реализации при решении такой задачи является теория пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева¹, деформационные соотношения которой устанавливают связи между инвариантами напряженного и деформированного состояния бетона и железобетона при кратковременном простом нагружении.

Данная работа посвящена установлению и исследованию критерия прочности плосконапряженных железобетонных элементов конструктивных систем зданий и сооружений при особых воздействиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Аналитическое выражение критерия прочности плосконапряженного железобетонного элемента записывается на основе общей деформационной модели теории пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева². В качестве ключевой гипотезы принято условие о возможности обобщения критерия прочности теории пластичности бетона и железобетона при статическом нагружении на режимное статико-динамическое нагружение железобетона. В основу решения задачи положены общие гипотезы теории пластичности бетона и железобетона и следующие дополнительные предположения:

1. Рассматривается характерный железобетонный элемент, моделирующий плосконапряженную зону конструкции, армированный ортогонально расположенными стержнями, совпадающими с направлениями осей координат системы xOy (рис. 1).

2. Размеры элемента велики по сравнению со средним расстоянием между стержнями. Это позволяет пренебречь местными напряжениями у контакта арматуры и бетона и «размазать» арматуру, задав ее коэффициентами армирования в виде непрерывных функций от координат (μ_x, μ_y). Таким образом, арматура представляется в виде непрерывно расположенных дисперсных волокон и рассматривается как упругопластическая анизотропная среда.

3. Принимается, что арматура воспринимает только нормальные напряжения, и ее коэффициенты Пуассона в осях, совпадающих с направлениями армирования, равны нулю. Это предположение обу-

¹ Гениев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.

² Гениев Г.А. Вариант деформационной теории пластичности бетона // Бетон и железобетон. 1969. № 2. С. 18–19.

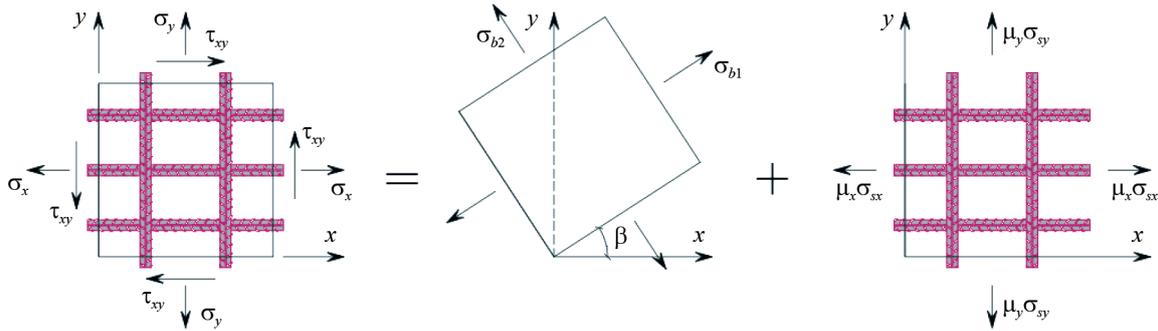


Рис. 1. Схема армирования и напряженного состояния характерного железобетонного элемента

Fig. 1. The reinforcement pattern and the diagram of the stress state of a characteristic reinforced concrete element

словлено тем, что пространственная арматурная сетка (без бетона) является геометрически изменяемой системой при действии касательного напряжения τ_{xy} .

4. Полные напряжения в характерном элементе складываются из напряжений в бетоне и арматуре (условия равновесия).

5. Условием совместности двух сред (бетон и арматуры) служит равенство их деформаций.

При построении аналитического условия прочности положительными напряжениями будем принимать сжимающие напряжения, растягивающие — отрицательными.

Пусть в каждой точке тела имеются два ортогональных направления армирования, параллельные координатным осям xOy . На основании принятых гипотез запишем напряжения условий равновесия в осях x, y в виде:

$$\sigma_{bx} + \mu_x \sigma_{sx} = \sigma_x; \sigma_{by} + \mu_y \sigma_{sy} = \sigma_y, \quad (1)$$

где μ_x, μ_y — коэффициент армирования в направлении x и y .

Принимаем также, что:

$$\tau_{bxy} = \tau_{xy}. \quad (2)$$

Условия совместности деформаций записываются в виде:

$$\varepsilon_{bx} = \varepsilon_{sx} = \varepsilon_x; \varepsilon_{by} = \varepsilon_{sy} = \varepsilon_y. \quad (3)$$

Физические уравнения деформационной теории пластичности Г.А. Гениева без учета дилатации для плоского напряженного состояния имеют вид:

$$\varepsilon_{bx} = \frac{1}{E(T)}(\sigma_{bx} - \nu \sigma_{by}); \varepsilon_{by} = \frac{1}{E(T)}(\sigma_{by} - \nu \sigma_{bx}), \quad (4)$$

где ν — коэффициент бокового расширения, величина которого для бетона может быть принята равной 1/6;

$$E(T) = E_0 \left(1 - \frac{T}{2T_s} \right) \quad (5)$$

— средний модуль упругопластичности бетона и является линейной функцией интенсивности касательных напряжений T ;

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_{b1} - \sigma_{b2})^2 + \sigma_{b1}^2 + \sigma_{b2}^2} \quad (6)$$

— интенсивность касательных напряжений, квадрат которой численно равен второму инварианту девиатора напряжений;

$$T_s = T_{sh} k(\lambda, \delta) \quad (7)$$

— предельное значение интенсивности касательных напряжений для рассматриваемого вида напряженного состояния;

$$T_{sh} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{R_b R_{bt}} \quad (8)$$

— предел прочности при чистом сдвиге;

$$k(\lambda, \delta) = \frac{\lambda(1+\delta)}{2} + \sqrt{\frac{\lambda^2(1+\delta)^2}{4} + (1+\delta)} \quad (9)$$

— коэффициент изменения предельного значения интенсивности касательных напряжений для рассматриваемого вида напряженного состояния по сравнению с предельным значением при чистом сдвиге T_{sh} ;

$$\lambda = f \frac{\sigma}{T}; \delta = e \left(\frac{S}{T} \right)^3; \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{b1} + \sigma_{b2}) \quad (11)$$

— среднее напряжение, совпадающее с точностью до постоянного коэффициента с первым инвариантом тензора напряжений;

$$S = \sqrt{3} \left[\frac{1}{2}(\sigma_{b1} - \sigma)(\sigma_{b2} - \sigma)(-\sigma) \right]^{1/3} \quad (12)$$

— инвариантная величина, третья степень которой с точностью до постоянного коэффициента совпадает с третьим инвариантом девиатора напряжений;

$$f = \frac{3T_{sh}(R_b - R_{bt})}{R_b R_{bt}}, e = \frac{R_b R_{bt}}{3T_{sh}^2} - 1 \quad (13)$$

— безразмерные коэффициенты, где R_b — предел прочности при одноосном сжатии, равный призмочной прочности бетона; R_{bt} — предел прочности

при одноосном растяжении, являющийся пределом прочности на одноосном отрыве.

Главные напряжения бетона при плоском напряженном состоянии могут быть определены графическим способом с помощью круга Мора (рис. 2) или по формуле:

$$\sigma_{b1}, \sigma_{b2} = \frac{\sigma_{bx} + \sigma_{by}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{bx} - \sigma_{by}}{2}\right)^2 + \tau_{bxy}^2}. \quad (14)$$

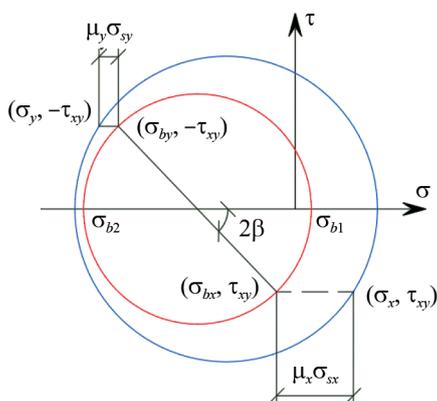


Рис. 2. Определение графическим способом с помощью круга Мора напряженного состояния характерного железобетонного элемента

Fig. 2. Using the graphical method, or the Mohr's circle of stress, to identify the stress state of a characteristic reinforced concrete element

Деформации в арматуре выявляются соотношениями:

$$\varepsilon_{sx} = \frac{\sigma_{sx}}{E_s}; \quad \varepsilon_{sy} = \frac{\sigma_{sy}}{E_s}, \quad (15)$$

где E_s — модуль упругости арматуры.

Из выражений (1)–(15) получим систему уравнения для определения напряжений бетона и арматуры ($\sigma_{sx}, \sigma_{bx}, \sigma_{sy}, \sigma_{by}$) в рассматриваемом железобетонном элементе:

$$\begin{cases} \sigma_{bx} + \mu_x \sigma_{sx} = \sigma_x; \\ \frac{\sigma_{bx} - \nu \sigma_{by}}{E_0 \left(1 - \frac{\sqrt{(\sigma_{b1} - \sigma_{b2})^2 + \sigma_{b1}^2 + \sigma_{b2}^2}}{2\sqrt{6}\Gamma_c k(\lambda, \delta)}\right)} = \frac{\sigma_{sx}}{E_s}; \\ \sigma_{by} + \mu_y \sigma_{sy} = \sigma_y; \\ \frac{\sigma_{by} - \nu \sigma_{bx}}{E_0 \left(1 - \frac{\sqrt{(\sigma_{b1} - \sigma_{b2})^2 + \sigma_{b1}^2 + \sigma_{b2}^2}}{2\sqrt{6}\Gamma_c k(\lambda, \delta)}\right)} = \frac{\sigma_{sy}}{E_s}; \\ \sigma_{b1}, \sigma_{b2} = \frac{\sigma_{bx} + \sigma_{by}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{bx} - \sigma_{by}}{2}\right)^2 + \tau_{bxy}^2} \end{cases} \quad (16)$$

Проверим условия прочности бетона. В системе координат главных напряжений σ_{b1}, σ_{b2} существует некоторая замкнутая фигура, являющаяся геометрической интерпретацией условия прочности бетона. Напряженные состояния, характеризующиеся точками внутри этой фигуры, не вызывают разрушения:

$$\sigma_{b1}^2 - \sigma_{b1}\sigma_{b2} + \sigma_{b2}^2 - (R_c - R_p)(\sigma_{b1} + \sigma_{b2}) - R_c R_p = 0. \quad (17)$$

Проверим условия прочности арматуры:

$$\sigma_{sx} \leq R_s; \quad \sigma_{sy} \leq R_s. \quad (18)$$

Метод проверки критерия прочности железобетонного элемента при плоском напряженном состоянии

Решение системы нелинейных уравнений (16) аналитическим способом в замкнутом виде невозможно. Поэтому предлагается приближенный способ проверки условий прочности железобетонного элемента при рассматриваемом плоском напряженном состоянии. При алгоритмизации решения данной нелинейной задачи предусмотрена итерационная процедура для нахождения напряжения в бетоне и арматуре, включающая следующие этапы.

Этап 1: задается исходная информация о напряжениях (усилиях), приложенных к железобетонному элементу $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ и физико-механические характеристики материалов R_c, R_p, R_s, E_s .

Этап 2: в первом приближении принимаются значения напряжений в арматуре равными $\sigma_{sx} = \sigma_{sy} = 0,9R_{bt}E_s/E_b$.

Этап 3: из условий равновесия определяются значения напряжений в бетоне:

$$\sigma_{bx} = \sigma_x - \mu_x \sigma_{sx}; \quad \sigma_{by} = \sigma_y - \mu_y \sigma_{sy}. \quad (19)$$

Этап 4: определяются деформации бетона и арматуры по формулам (4) и (15).

Этап 5: выполняется проверка условия совместности работы бетона и арматуры по формуле:

$$\Delta_x = |\varepsilon_{bx} - \varepsilon_{sx}| \leq a; \quad \Delta_y = |\varepsilon_{by} - \varepsilon_{sy}| \leq a. \quad (20)$$

Этап 6: если хотя бы одно из неравенств на этапе 5 не выполняется, то делается второе приближение для напряжений в арматуре. Итерационный расчет повторяется до тех пор, пока значения деформаций в бетоне и арматуре будут отличаться на заданную в исходных данных погрешность.

Этап 7: если неравенства этапа 5 выполняются, то итерации на данном шаге считаются завершенными, и по формуле (14) находятся главные напряжения в бетоне.

Этап 8: проверяется условие прочности для бетона и арматуры по формулам (17), (18).

Общая схема для проверки критериев прочности железобетонного элемента при плоском напряженном состоянии представлена в виде блок-схемы (рис. 3).

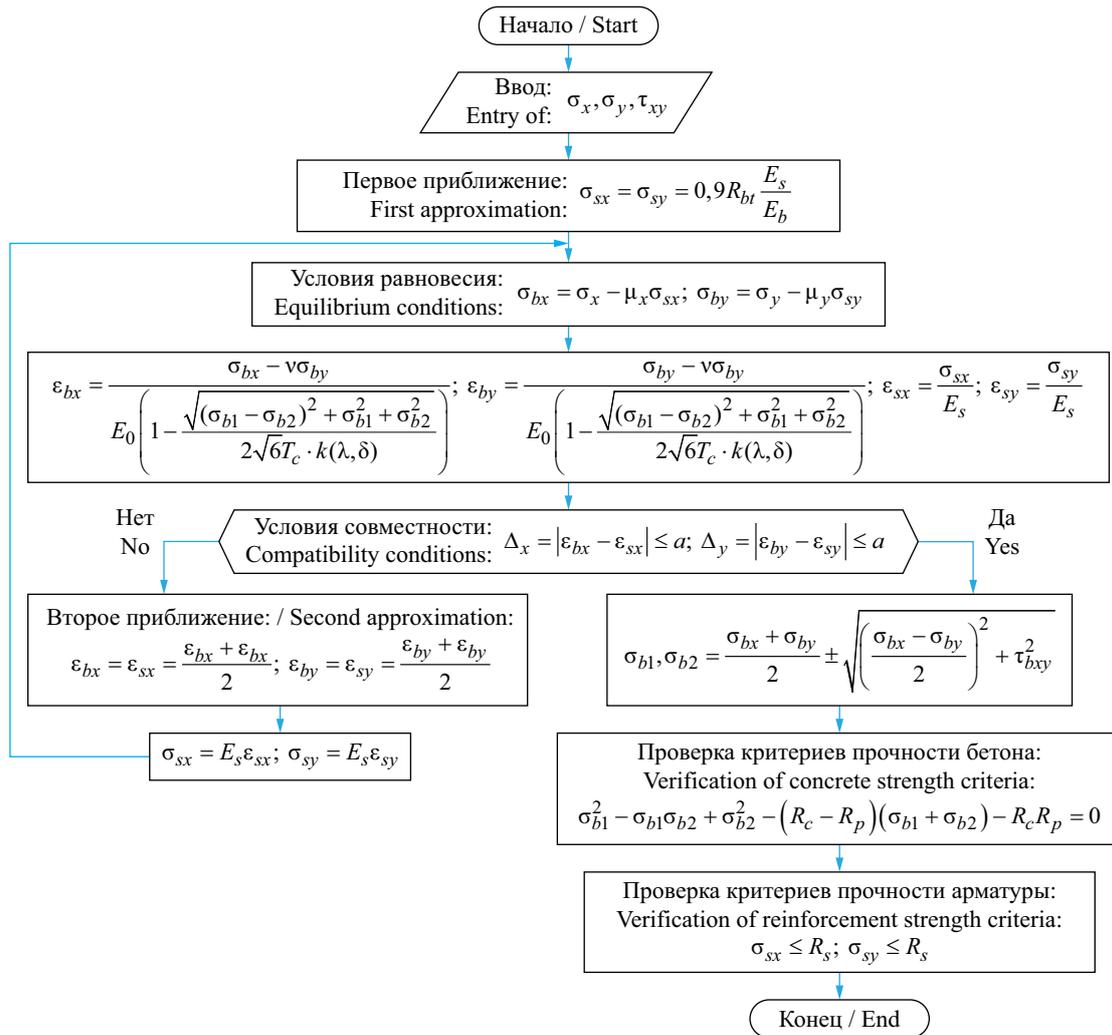


Рис. 3. Блок-схема для проверки критериев прочности железобетонного элемента при плоском напряженном состоянии

Fig. 3. The flow chart designated for verifying the strength criteria applicable to a reinforced concrete element in a plane stress state

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С использованием разработанного алгоритма показан численный пример расчета критериев прочности железобетонного элемента при плоском напряженном состоянии.

В качестве объекта исследования принята конструкция двухпролетной трехэтажной железобетонной монолитной рамы (рис. 4, а). Расчет выполнен при следующих исходных данных: сечение ригелей рамы $b \times h = 50 \times 100$ мм, их армирование в растянутых зонах принято двумя стержнями диаметром 8 мм класса А500, и в сжатой зоне — одним стержнем диаметром 4 мм класса А500. Поперечная арматура ригелей принята из проволоки диаметром 2 мм, шагом 50 мм на приопорных участках и 100 мм — в пролете. Схема армирования опытной конструкции приведена на рис. 4, б. Конструкция изготовлена из мелкозернистого бетона класса В40.

Нагружение конструкций рам производилось в два этапа. На первом этапе конструкции были

нагружены статической нагрузкой в виде двух сосредоточенных сил в пролете каждого ригеля. На втором этапе конструкции рам нагружались динамическим воздействием в виде внезапного удаления средней или крайней стойки.

Выбор этой конструкции для численного анализа обусловлен тем, что для таких рам были проведены экспериментальные исследования [12–13], результаты которых и, в частности, полученные опытные картины разрушения могут быть использованы для проверки предложенного аналитического условия прочности.

Интерес представляет напряженное состояние узла сопряжения ригеля с колонной, схема которого представлена на рис. 4, с. Выделим на этой схеме два характерных железобетонных элемента размерами $28,4 \times 24,4$ мм для дальнейшего расчета на втором уровне — проверки критерия прочности. При расчете были приняты следующие физические характеристики выделенных железобетонных эле-

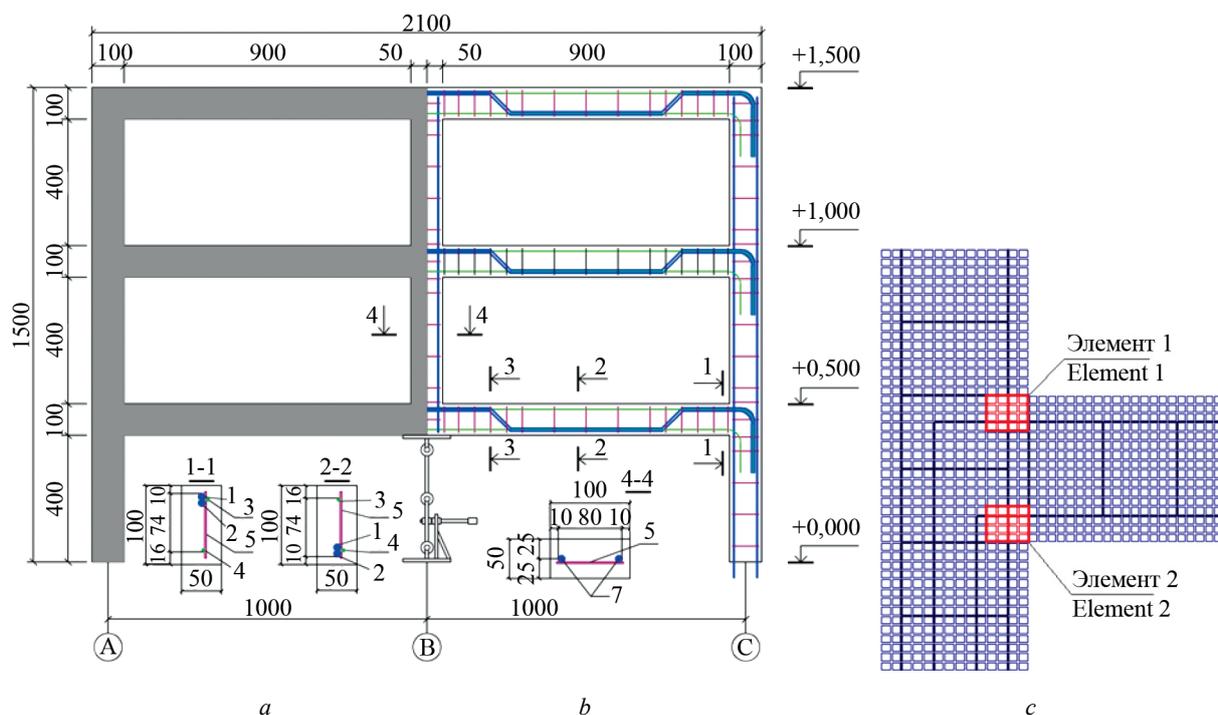


Рис. 4. Схема конструкции опытной рамы: опалубка (а); схема армирования (b); конечно-элементная схема сопряжения ригеля с колонной припорной зоны с выделенными характерными элементами (с)

Fig. 4. An experimental frame diagram: formwork (a); reinforcement pattern (b); finite element girder-to-column connection in the support zone having highlighted characteristic elements (c)

ментов: $R_c = 22$ МПа; $R_p = 1,4$ МПа; $E_b = 3,6 \cdot 10^4$ МПа; $R_s = 500$ МПа; $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа.

С использованием конечно-элементной модели по расчетной схеме второго уровня (терминология принята по СП 385.1325800.2018³) определены усилия в характерных железобетонных элементах 1 и 2 (σ_x , σ_y , τ_{xy}) после приложения запроектного воздействия. Их численные значения показаны на рис. 5. При мгновенном приложении запроектного воздей-

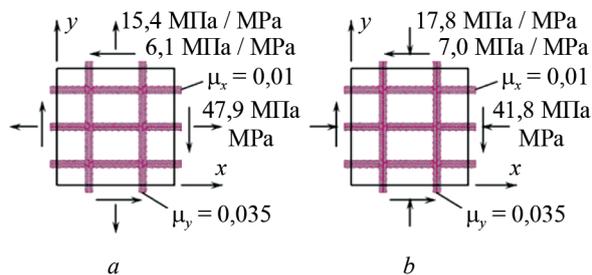


Рис. 5. Исходное напряженное состояние для проверки критериев прочности характерного элемента 1 (а) и 2 (b) по расчетной схеме второго уровня

Fig. 5. Initial stress state for the verification of strength criteria of characteristic elements 1 (a) and 2 (b) according to the second-level analysis pattern

ствия к вычисленным усилиям в исходной системе, согласно СП 385.1325800.2018, прибавятся усилия, действовавшие в удаляемой колонне с обратным знаком.

Результаты расчета напряжений в характерном плосконапряженном элементе, вычисленные после приложения запроектного воздействия, графически представлены на рис. 6 а, b.

Критерий прочности бетона для характерных элементов 1 и 2 представлен на рис. 7, а. На рис. 7, b показан общий вид разрушения узла сопряжения ригеля с колонной.

Анализ полученных количественных значений напряжений в железобетоне характерного элемента сжатой зоны показывает, что эти напряжения превышают призменную прочность бетона на сжатие, что и подтверждается характером разрушения рассматриваемого узла рамы после приложения запроектного воздействия (см. рис. 7, b). Максимальное напряжение в арматуре в растянутом характерном элементе составило 132,5 МПа и не превысило предельного значения прочности арматуры. Деформации арматуры составили 0,0066 и, следовательно, по критерию СП 385.1325800.2018 разрыва арматуры при рассматриваемом особом воздействии не происходит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Построенный на основе теории пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева вариант крите-

³ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. М. : Минстрой России, 2018. 33 с.

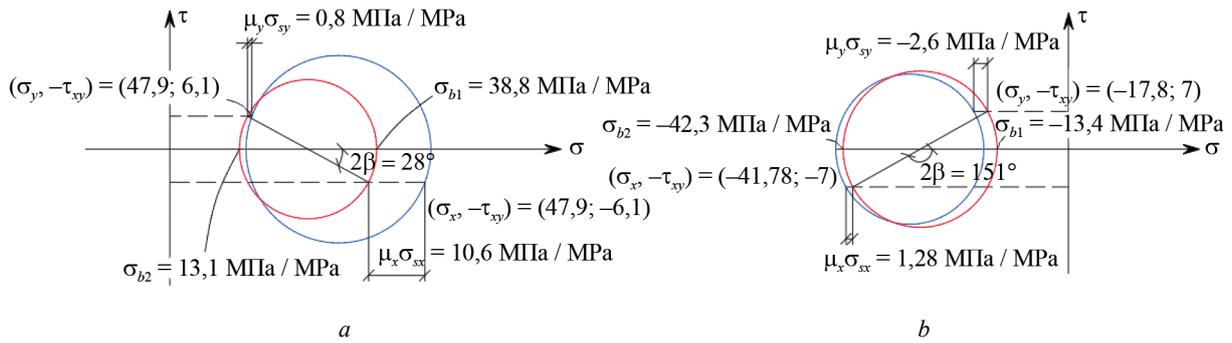


Рис. 6. Напряжения в характерном элементе 1 (a) и 2 (b) в виде кругов Мора

Fig. 6. Stresses in characteristic elements 1 (a) and 2 (b) represented as Mohr's circles

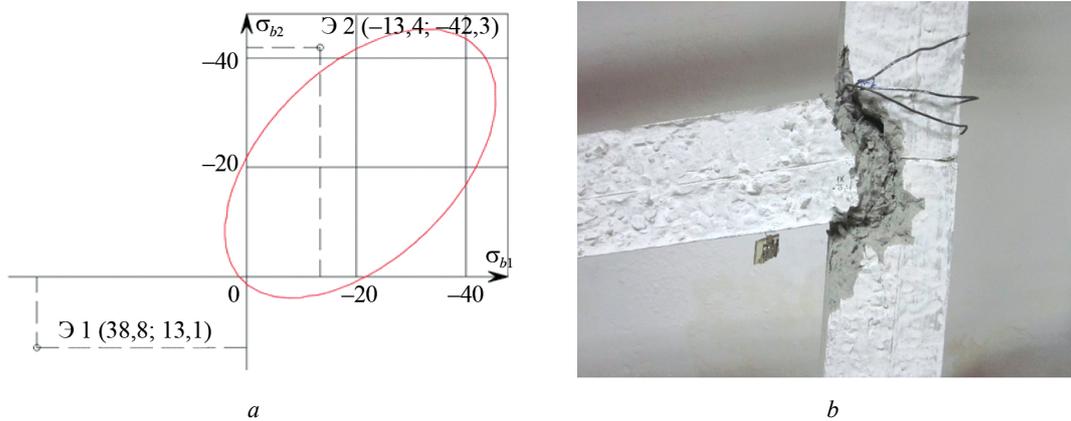


Рис. 7. Критерий прочности характерного элемента (a) и общий вид картины разрушения в зоне сопряжения ригеля с колонной (b)

Fig. 7. Strength criterion for characteristic element (a) and the general view of destruction in the area of the girder-to-column connection (b)

рия прочности железобетона при плоском напряженном состоянии и алгоритм его реализации могут быть использованы для анализа особого предельного состояния железобетонных элементов конструктивных систем каркасов зданий и сооружений.

Сопоставление результатов расчета железобетонной рамно-стержневой конструктивной системы, моделирующей каркас многоэтажного здания на особое воздействие в виде внезапного удаления

одной из колонн в запредельном состоянии с использованием предложенного критерия прочности и результатов испытаний этой конструкции, показало удовлетворительное их согласование. В частности, качественный характер картины разрушения зоны сопряжения ригеля первого этажа с колонной, полученный в опытах, соответствует картине разрушения, установленной по предельным напряжениям предложенного критерия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability of structural systems of buildings with special effects // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 5 (81). С. 73–80. DOI: 10.18720/MCE.81.8
2. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 2. С. 28–31.
3. Алмазов В.О. Проблемы прогрессирующего разрушения // Строительство и реконструкция. 2014. № 6 (56). С. 3–10.
4. Deng X.-F., Liang S.-L., Fu F., Qian K. Effects of high-strength concrete on progressive collapse resistance of reinforced concrete frame // Journal of Structural Engineering. 2020. Vol. 146. Issue 6. P. 04020078. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002628

5. Ferraioli M. A modal pushdown procedure for progressive collapse analysis of steel frame structures // *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 156. Pp. 227–241. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.02.003
6. Зенин С.А., Шарипов Р.Ш., Кудинов О.В., Шатири Г.И., Гасанов А.А. Расчеты крупнопанельных зданий на устойчивость против прогрессирующего обрушения методами предельного равновесия и конечного элемента // *Academia. Архитектура и строительство*. 2016. № 4. С. 109–113.
7. Kabantsev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithic reinforced concrete bearing systems in the mode of progressive collapse // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 251. P. 02047. DOI: 10.1051/MATECCONF/201825102047
8. Кодыш Э.Н. Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом возникновения особого предельного состояния // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 10. С. 95–101.
9. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Аул А.А., Дмитриев Д.С., Дядченко Ю.Н., Нагибович А.И. и др. Расчетное обоснование механической безопасности стадионов к Чемпионату мира по футболу 2018 года // *Academia. Архитектура и строительство*. 2018. № 3. С. 118–129. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-3-118-129
10. Pham A.T., Tan K.H. Analytical model for tensile membrane action in RC Beam-Slab structures under internal column removal // *Journal of Structural Engineering*. 2019. Vol. 145. Issue 6. P. 04019040. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002303
11. Xuan W., Wang L., Liu C., Xing G., Zhang L., Chen H. Experimental and theoretical investigations on progressive collapse resistance of the concrete-filled square steel tubular column and steel beam frame under the middle column failure scenario // *Shock and Vibration*. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2019/2354931
12. Kolcunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. P. 032037. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032037
13. Fedorova N.V., Ngoc V.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1425. P. 012033. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012033
14. Демьянов А.И., Колчунов В.И., Сальников А.С., Михайлов М.М. Расчетные модели статико-динамического деформирования железобетонной конструкции при кручении с изгибом в момент образования пространственной трещины // *Строительство и реконструкция*. 2017. № 3 (71). С. 13–22.
15. Qian K., Liang S.-L., Feng D.-C., Fu F., Wu G. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of post-tensioned precast concrete beam-column subassemblages // *Journal of Structural Engineering*. 2020. Vol. 146. Issue 9. P. 04020170. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002714
16. Yang T., Chen W., Han Z. Experimental investigation of progressive collapse of prestressed concrete frames after the loss of middle column // *Advances in Civil Engineering*. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2020/8219712
17. Shan S., Li S., Xu S., Xie L. Experimental study on the progressive collapse performance of RC frames with infill walls // *Engineering Structures*. 2016. Vol. 111. Pp. 80–92. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.12.010
18. Yu J., Tan K.H. Special detailing techniques to improve structural resistance against progressive collapse // *Journal of Structural Engineering*. 2014. Vol. 140. Issue 3. P. 04013077. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000886.
19. Qian K., Li B. Effects of masonry infill wall on the performance of RC frames to resist progressive collapse // *Journal of Structural Engineering*. 2017. Vol. 143. Issue 9. P. 04017118. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001860
20. Kang S.B., Tan K.H., Yang E.H. Progressive collapse resistance of precast beam-column sub-assemblages with engineered cementitious composites // *Engineering Structures*. 2015. Vol. 98. Pp. 186–200. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.04.034
21. Al-Salloum Y.A., Alrubaidi M.A., Elsanadedy H.M., Almusallam T.H., Iqbal R.A. Strengthening of precast RC beam-column connections for progressive collapse mitigation using bolted steel plates // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 161. Pp. 146–160. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.02.009

Поступила в редакцию 13 ноября 2020 г.

Принята в доработанном виде 20 ноября 2020 г.

Одобрена для публикации 23 ноября 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Наталья Витальевна Федорова** — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой архитектурно-строительного проектирования, директор филиала НИУ МГСУ в г. Мытищи; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 3365-8320, Scopus: 57196437054, ResearcherID: O-8119-2015, ORCID: 0000-0002-5392-9150; FedorovaNV@mgsu.ru;

Ву Нгок Туен — аспирант кафедры уникальных зданий и сооружений; **Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ)**; 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94; SPIN-код: 5948-4496, Scopus: 57215934802, ORCID: 0000-0001-5755-8345; ngoctuyennd91@gmail.com;

Игорь Анатольевич Яковенко — доктор технических наук, доцент, профессор, заведующий кафедрой строительства; **Национальный университет биоресурсов и природопользования (НУБиП)**; Украина, 03041, г. Киев, ул. Героев Оборона, д. 19, SPIN-код: 3365-8320, Scopus: 57193061888, ResearcherID: F-5917-2019, ORCID: 0000-0003-4256-9855; i2103@ukr.net.

REFERENCES

1. Travush V.I., Fedorova N.V. Survivability of structural systems of buildings with special effects. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 81(5):73-80. DOI: 10.18720/MCE.81.8
2. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. The concept and directions of development of the theory of structural safety of buildings and structures under the influence of force and environmental factors. *Industrial and Civil Engineering*. 2013; 2:28-31. (rus.).
3. Almazov V.O. The problems of progressive collapse. *Building and Reconstruction*. 2014; 6(56):3-10. (rus.).
4. Deng X.-F., Liang S.-L., Fu F., Qian K. Effects of high-strength concrete on progressive collapse resistance of reinforced concrete frame. *Journal of Structural Engineering*. 2020; 146(6):04020078. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002628
5. Ferraioli M. A modal pushdown procedure for progressive collapse analysis of steel frame structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019; 156:227-241. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.02.003
6. Zenin S.A., Sharipov R.Sh., Kudinov O.V., Shapiro G.I., Gasanov A.A. Methods of calculating of large-panel buildings: how to prevent progressing collapse. *Academia. Architecture and Construction*. 2016; 4:109-113. (rus.).
7. Kabantsev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithic reinforced concrete bearing systems in the mode of progressive collapse. *MATEC Web Conferences*. 2018; 251:02047. DOI: 10.1051/MATECCONF/201825102047
8. Kodysh E.N. Designing the protection of buildings and structures against progressive collapse in view of the emergence of a special limiting state. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 10:95-101. (rus.).
9. Belostotskiy A.M., Akimov P.A., Aul A.A., Dmitriev D.S., Dyadchenko Yu.N., Nagibovich A.I. et al. Analysis of mechanical safety of stadiums for the World Cup 2018. *Academia. Architecture and Construction*. 2018; 3:118-129. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-3-118-129 (rus.).
10. Pham A.T., Tan K.H. Analytical model for tensile membrane action in RC Beam-Slab structures under internal column removal. *Journal of Structural Engineering*. 2019; 145(6):04019040. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002303
11. Xuan W., Wang L., Liu C., Xing G., Zhang L., Chen H. Experimental and theoretical investigations on progressive collapse resistance of the concrete-filled square steel tubular column and steel beam frame under the middle column failure scenario. *Shock and Vibration*. 2019; 2019:1-12. DOI: 10.1155/2019/2354931
12. Kolcunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 753:032037. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032037
13. Fedorova N.V., Ngoc V.T. Deformation and failure of monolithic reinforced concrete frames under special actions. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1425:012033. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012033
14. Dem'yanov A.I., Kolchunov V.I., Sal'nikov A.S., Mikhaylov M.M. The calculation models of static and dynamic deformation reinforced concrete constructions in torsion with bending at the time of the spatial crack formation. *Building and Reconstruction*. 2017; 77(3):13-22. (rus.).
15. Qian K., Liang S.-L., Feng D.-C., Fu F., Wu G. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of post-tensioned precast concrete beam-column subassemblages. *Journal of Structural Engineering*. 2020; 146(9):04020170. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002714
16. Yang T., Chen W., Han Z. Experimental investigation of progressive collapse of prestressed concrete frames after the loss of middle column. *Advances in Civil Engineering*. 2020; 2020:1-12. DOI: 10.1155/2020/8219712
17. Shan S., Li S., Xu S., Xie L. Experimental study on the progressive collapse performance of RC frames with infill walls. *Engineering Structures*. 2016; 111:80-92. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.12.010
18. Yu J., Tan K.H. Special detailing techniques to improve structural resistance against progressive collapse. *Journal of Structural Engineering*. 2014; 140(3):04013077. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000886
19. Qian K., Li B. Effects of masonry infill wall on the performance of RC Frames to resist progressive collapse. *Journal of Structural Engineering*. 2017;

143(9):04017118. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001860

20. Kang S.B., Tan K.H., Yang E.H. Progressive collapse resistance of precast beam-column sub-assemblies with engineered cementitious composites. *Engineering Structures*. 2015; 98:186-200. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.04.034

21. Al-Salloum Y.A., Alrubaidi M.A., Elsanadedy H.M., Almusallam T.H., Iqbal R.A. Strengthening of precast RC beam-column connections for progressive collapse mitigation using bolted steel plates. *Engineering Structures*. 2018; 161:146-160. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.02.009

Received November 13, 2020.

Adopted in revised form on November 20, 2020.

Approved for publication on November 23, 2020.

BIONOTES: **Natalia V. Fedorova** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Architectural and Construction Design, Director of the branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) in Mytishchi; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 3365-8320, Scopus: 57196437054, ResearcherID: O-8119-2015, ORCID: 0000-0002-5392-9150; FedorovaNV@mgsu.ru;

Vu Ngoc Tuyen — postgraduate student of the Department of Unique buildings and structures; **Southwest State University (SWSU)**; 94 50 years of October st., Kursk, 305040, Russian Federation; SPIN-code: 5948-4496, Scopus: 57215934802, ORCID: 0000-0001-5755-8345; ngoctuyennd91@gmail.com;

Igor A. Yakovenko — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Head of the Department of Construction; **National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (NUBiP)**; 19 Heroes of Defense st., Kiev, 03041, Ukraine; SPIN-code: 3365-8320, Scopus: 57193061888, ResearcherID: F-5917-2019, ORCID: 0000-0003-4256-9855; i2103@ukr.net.

Оценка солеобразования на цементных композитах по отсканированным изображениям

В.Т. Ерофеев¹, В.В. Афонин¹, Т.Ф. Ельчищева², М.М. Зоткина¹, И.В. Ерофеева¹

¹ Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева); г. Саранск, Россия;

² Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ); г. Тамбов, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Предлагается инженерная методика оценки солеобразования на поверхности цементных композитов при экспонировании в неблагоприятных условиях эксплуатации. В основу методики положен метод гистограмм по определению доминирующей яркости полутонового изображения отсканированных цементных композитов. Критерием ранжирования композитов служит относительная безразмерная величина — метрика, получаемая в результате сравнения яркости полутонового изображения с уровнем яркости белого цвета.

Материалы и методы. Выбраны три типа состава композитов в количестве 21 наименования, каждый из которых содержит три образца — контрольный и образцы, экспонированные в течение 15 и 45 суток при повышенной влажности и положительных температурах. Каждый состав композитов представлен отсканированным растровым изображением поверхности образцов. Изображения в дальнейшем подвергаются компьютерной цифровой обработке с помощью программы, составленной на языке программирования C++, и библиотеки технического зрения OpenCV. Это позволяет использовать имеющиеся методы и классы как для программной алгоритмизации поставленной задачи, так и для применения преобразования полноцветного изображения RGB в полутоновое изображение. Такие изображения используются для вычисления гистограмм, по которым определяется доминантный уровень яркости, который, в свою очередь, позволяет определить числовую метрику для количественной оценки солеобразования на поверхности образцов цементных композитов по их отсканированным изображениям.

Результаты. Приведено описание программного алгоритма определения солеобразования на поверхности образцов цементных композитов, прошедших эксплуатационные испытания в условиях повышенной влажности при положительных температурах. Показаны особенности ранжирования образцов цементных композитов по значениям уровня доминирующей яркости относительно яркости контрольных образцов. Сравнительный анализ исследования представлен в виде числовых данных и пояснительных диаграмм.

Выводы. На основе проведенного программного моделирования показана целесообразность применения разработанной методики для оценки солеобразования на поверхности цементных композитов и других строительных материалов, склонных к солеобразованию.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементные композиты, солеобразование, гистограмма, доминантный уровень яркости, RGB, полутоновое изображение, экспонирование

Благодарности. Публикуется при поддержке гранта РФФИ РМ № 18-48-130013 «Комплексное исследование физико-химических процессов в композиционных материалах на основе эпоксидных смол и других синтетических полимеров, перспективных для применения в строительстве».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ерофеев В.Т., Афонин В.В., Ельчищева Т.Ф., Зоткина М.М., Ерофеева И.В. Оценка солеобразования на цементных композитах по отсканированным изображениям // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 11. С. 1523–1533. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1523-1533

Using scanned images to estimate salt formation on the surface of cement composites

Vladimir T. Erofeev¹, Victor V. Afonin², Tatiana F. Elchishcheva¹,
Marina M. Zotkina¹, Irina V. Erofeeva¹

¹ National Research Ogarev Mordovia State University; Saransk, Russian Federation;

² Tambov State Technical University (TSTU); Tambov, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. An engineering method is proposed for assessing salt formation on the surface of cement composites exposed to adverse operating conditions. The technique is based on the histogram method used to determine the dominant brightness of the half-tone image of scanned cement composites. The criterion for ranking composites is a relative dimensionless value — a metric obtained by comparing the brightness of a grayscale image with the brightness level of white.

Materials and methods. We selected three types of compositions of composites in the amount of 21 items; each of them contains three samples — a control sample and samples exposed to high humidity and positive temperatures for 15 and 45 days. Each composition is represented by a scanned raster image of the sample surface. The images are further subjected

to digital processing using a software program written in the C++ programming language and the OpenCV technical vision library. This allows you to use the available methods and classes to develop algorithms to solve the problem in question and to convert a full-color RGB image to a grayscale image. Such images are used to analyze histograms, which determine the dominant level of brightness to determine the numerical metric for quantifying the salt formation on the surface of cement composite samples on the basis of their scanned images.

Results. A description of the software algorithm, used to detect salt formation on the surface of cement composite specimens that have passed performance tests under high humidity conditions at positive temperatures, is presented. The method of ranking cement composite samples using the values of their dominant brightness relative to the brightness of control samples is shown. The comparative analysis of the study is presented in the form of numerical data and explanatory diagrams.

Conclusions. Software modeling is employed to demonstrate the expediency of the methodology for the assessment of salt formation on the surface of cement composites and other building materials prone to salt formation.

KEYWORDS: cement composites, salt formation, histogram, dominant brightness level, RGB, grayscale image, exposure

Acknowledgements: Published with the support from RFBR RM grant No. 18-48-130013 "Comprehensive study of physical and chemical processes in composite materials containing epoxy resins and other synthetic polymers, having strong potential for use in construction".

FOR CITATION: Erofeev V.T., Afonin V.V., Elchishcheva T.F., Zotkina M.M., Erofeeva I.V. Using scanned images to estimate salt formation on the surface of cement composites. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(11):1523-1533. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1523-1533 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Цементные композиты и другие строительные материалы постоянно изучаются различными исследователями и научными школами. Большое внимание уделяется поведению цементных композитов и строительных конструкций в экстремальных условиях эксплуатации [1–9].

Определенные исследования связаны с солеобразованием на цементных композитах и строительных материалах [10–13]. Как показано в перечисленных источниках, эти работы имеют важное практическое значение. Поэтому в данной статье также затрагиваются вопросы солеобразования на цементных композитах, выдержанных в экстремальных эксплуатационных условиях. В основу исследований положено предположение, что визуальным результатом солеобразования является изменение яркости поверхности композитов в сторону ее приближения к белому цвету. В связи с этим применяются методы цифровой обработки отсканированных изображений образцов композитов, выдержанных в неблагоприятных условиях. В частности, предлагается применение метода гистограмм, с помощью которого определяется доминантный уровень яркости соответствующего полутонового изображения. Предварительно осуществляется преобразование полноцветного изображения цветовой модели RGB (Red, Green, Blue – красный, зеленый, синий цвета, аддитивная цветовая модель изображения) в полутоновое изображение в оттенках серого цвета (grayscale). Для этого используются классы и методы библиотеки технического зрения OpenCV. Существующие в настоящее время различные методы и приемы оценки качества растровых изображений включают также оценку качества цементных композитов и других строительных материалов [14–24].

При цифровой обработке изображений с помощью метода гистограмм имеются определенные на-

работки, которые с успехом применяются в различных сферах [25–32]. С помощью метода гистограмм можно получить интегральную оценку распределения яркости изображений. Этот метод положен в основу разработанной авторами методики определения количества солей на поверхности цементных композитов, экспонированных в неблагоприятных условиях.

Как известно, гистограмма — это график распределения интенсивности в изображении [25, 26]. На горизонтальной оси графика откладывается шкала яркостей тонов от черного до белого, на вертикальной оси — число пикселей заданной яркости. Шаг по оси абсцисс соответствует одному уровню яркости, всего имеется 256 значений уровня. В данном случае метод гистограмм используется не для улучшения качества изображения, а для выявления особенностей поверхности образцов материала, произошедших в результате экспонирования цементных композитов при неблагоприятных условиях эксплуатации. Для этого определяется доминирующий уровень яркости, который сравнивается с величиной яркости белого цвета. На основе этого устанавливаются те изображения композитов, у которых доминантный уровень яркости гистограммы приближается к белому цвету, соответствующему величине уровня, равной 255.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Всего было изготовлено три группы составов цементных композитов. В качестве основы в составах всех композитов применялся цемент ульяновский ПЦ500 Д0. В первой группе в состав композитов дополнительно вводились следующие компоненты: вода; гиперпластификатор (ГП) Melflux 1641F; суперпластификаторы (СП) «Фортрайс™» Стронг и Хидетал-П-5; микрокремнезем (МК), песок молотый (микрокварц); песок фракции 0–0,63 мм и песок фракции 0,63–2,5 мм.

Во второй группе в состав вводились: вода; ГП Melflux 5581; МК, песок молотый (микрокварц); песок фракции 0,63–2,5 мм; биоцидные добавки — MultiDEZ Дезинфектант, Teflex Универсальный, Тейфлекс-Антиплесень и Ультрадес-Био. В третьей группе в составе композитов присутствовала вода, неактивированная и активированная по различным режимам. Номера и имена составов цементных композитов приняты в соответствии с табл. 1.

Табл. 1. Составы цементных композитов
Table 1. Compositions of cement composites

1-я группа 1st group	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2-я группа 2st group	T1	T2	T3	T5	T6	T8	T9	T17	
3-я группа 3st group	M0	M1	M3	M6					

Образцы цементных композитов испытывались при повышенной влажности (98 %) и переменных повышенных температурах (от 23 до 60 °С) [3, 5] в течение 15 и 45 суток. В качестве материалов для исследования были приняты тестовые изображения, полученные в результате метода прямого сканирования [16]. Каждый состав композита имел три отсканированных изображения. Всего рассматривался 21 состав образцов и, соответственно, 63 изображения. Для проведения компьютерной обработки изображений поверхностей составы распределялись по каталогам.

Общая схема обработки изображений и определения доминантного уровня яркости показана на рис. 1.

Кроме определения доминантного уровня яркости, предлагается использовать специальный расчет числовой метрики, представляющей безразмерную величину и характеризующей степень приближения доминантной яркости отсканированного изображения к белому цвету.

При испытании серии образцов (img1, img2, ...) ожидаемо будет изменяться доминантный уровень яркости. Пусть будет m изображений в каждом каталоге (рис. 1). Тогда возможны два основных случая: когда доминантный уровень яркости m -го изображения превышает значение уровня яркости изображения контрольного образца и когда он меньше указанного уровня яркости. Это означает, что изображения цементных композитов могут быть разделены на две группы. Величина сравнения соответствует яркости, равной 255.

Считая, что рассматриваются не монохромные изображения, можно заключить, что они имеют начальный уровень яркости менее 255. Для заданного состава композита обозначим уровень яркости полутонового изображения контрольного образца через $dFirst$, а последнего — через $dEnd$. Тогда расчет числовой метрики $D1$ для первой группы изображений будет определяться по следующему выражению:

$$D1 = \frac{255 - (dEnd - dFirst)}{255}.$$

Очевидно, что если цветовые показатели поверхности образцов не меняются при экспонировании, то метрика будет стремиться к 1. Соответственно, в другом предельном случае метрика будет стремиться к нулю, указывая на возникновение солеобразования на поверхности образцов.

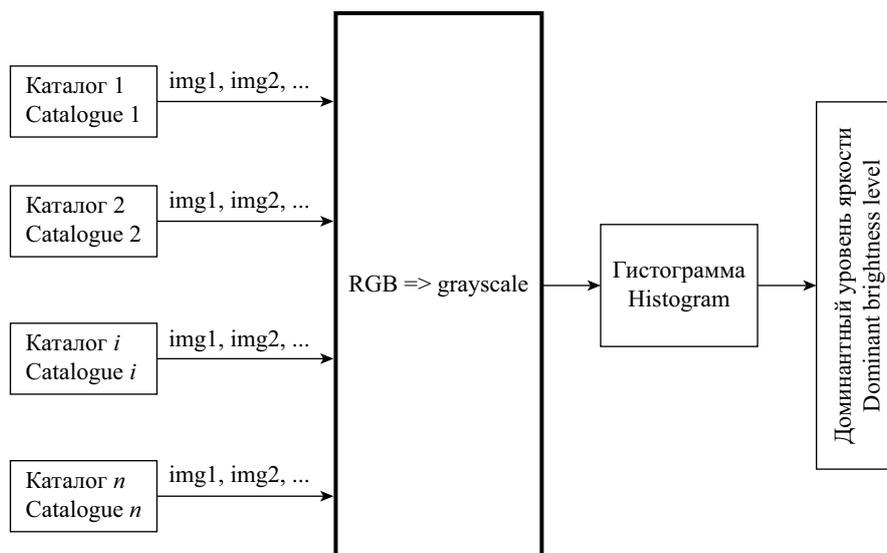


Рис. 1. Схема определения доминантного уровня яркости
Fig. 1. Dominant brightness level identification flow chart

Вторая метрика $D2$ определяется для второй группы изображений, когда доминантный уровень яркости $dEnd$ не превышает $dFirst$. При этом сначала определяется уровень яркости гистограммы для предпоследнего испытания, например, с обозначением $d2nd$. Тогда величина $dEnd$ может превышать или не превышать величину $d2nd$. В последнем случае метрика $D2$ будет определяться по выражению:

$$D2 = \frac{255 - (dFirst - dEnd)}{255}$$

Если $dEnd$ превышает $d2nd$, то это означает, что возникает тенденция приближения доминантного уровня яркости к белому цвету. Поэтому следует наложить «штрафные санкции», т.е. численным образом зафиксировать данную нежелательную тенденцию:

$$D2 = \frac{255 - (dFirst + (dEnd - d2nd))}{255}$$

Если учесть возможность возникновения отрицательной метрики, то расчет должен быть выполнен по формуле:

$$D2 = \frac{(dFirst + (dEnd - d2nd)) - 255}{255}$$

Метрика $D2$ в общем случае принадлежит отрезку $[0; 1]$. При этом для образцов без солеобразования на их поверхности метрика $D2$ стремится к единице.

При проведении численных экспериментов использовалась программа, написанная на языке программирования C++, и библиотека OpenCV, в которой существуют методы по преобразованию цветных пространств и вычислению гистограмм для полутоновых изображений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспонирование исследуемых образцов цементных композитов выполнялось по следующему термоциклу:

1. Нагрев образцов композитов от комнатной температуры 23 до 60 °C при влажности 98 %, продолжительность нагрева около 5 мин.
2. Выдержка образцов при температуре 60 °C и влажности 98 % в течение 9 часов.
3. Естественное остывание образцов при выключенной камере до комнатной температуры 23 °C при влажности 98 % в течение не менее 5 часов.
4. Выдержка образцов при температуре 23 °C и влажности 98 % в течение 9 часов.

Точки временного сканирования образцов каждого из составов цементных композитов составляют 0, 15 и 45 суток. Рассматривался 21 состав материалов с приведенными выше обозначениями — 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, T1, T2, T3, T5, T6, T8, T9, T17, M0, M1, M3, M6. Всего исследовалось 63 образца.

Результаты обработки отсканированных изображений образцов цементных композитов сведены

в табл. 2 и 3. При этом в табл. 2 представлены результаты ранжирования первой группы изображений, «худших» с точки зрения наличия высолов на поверхности образцов цементных композитов. В табл. 3 приведены результаты ранжирования второй группы изображений — «лучших» образцов с меньшим высаливанием на поверхности.

Установлено, что образец состава 8 является наиболее стойким к солеобразованию, а образец состава T17 — менее стойкий к солеобразованию.

На рис. 2 и 3 показано изменение доминантных уровней яркости «лучшего» состава 8 и «худшего» состава T17.

На рис. 4 и 5 приведены отсканированные изображения поверхностей образцов составов 8 и T17, где рисунки под буквами *a*, *b* и *c* — продолжительность выдержки образцов до испытаний, соответственно, 0 суток (контрольный образец), 15 и 45 суток. Состав исследуемых цементных композитов отражен в табл. 4, 5 и 6.

Табл. 2. Результаты ранжирования первой группы изображений («худших») образцов

Table 2. The 1st group of sample images (the worst ones). Ranking results

Имена / The names	Метрика / Metrics
T17	0,823529
M0	0,827451
M1	0,858824
M3	0,866667
T2	0,886275
T1	0,901961
2	0,933333
4	0,937255
9	0,937255
M6	0,949020
T8	0,949020
T6	0,956863
T3	0,972549
10	0,976471
6	0,984314

Табл. 3. Результаты ранжирования второй группы изображений («лучших») образцов

Table 3. The 2nd group of sample images (the best ones). Ranking results

Имена / The names	Метрика / Metrics
8	0,976471
5	0,972549
T5	0,972549
3	0,898039
1	0,584314
T9	0,533333

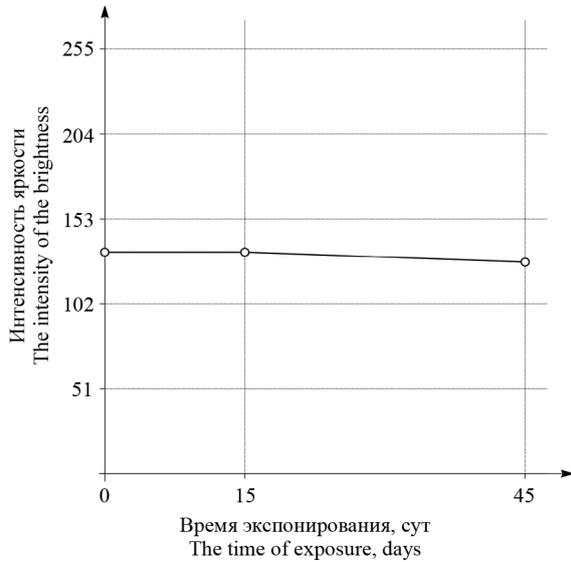


Рис. 2. Изменение доминантной яркости состава 8 за время экспонирования

Fig. 2. Changing the dominant brightness of composition 8 in the course of exposure

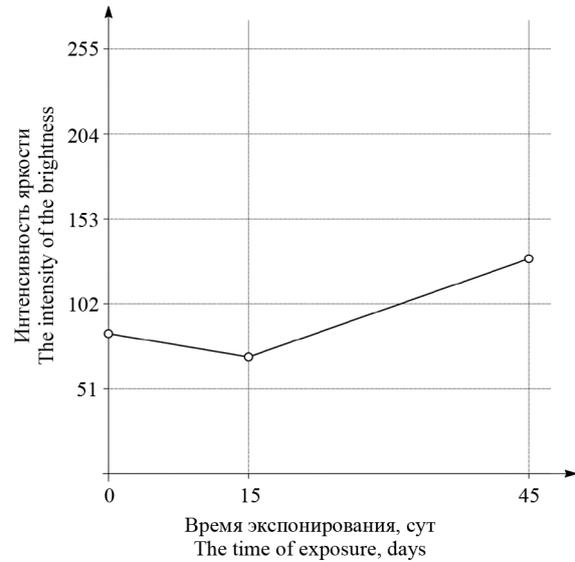


Рис. 3. Изменение доминантной яркости состава T17 за время экспонирования

Fig. 3. Changing the dominant brightness of composition T17 in the course of exposure

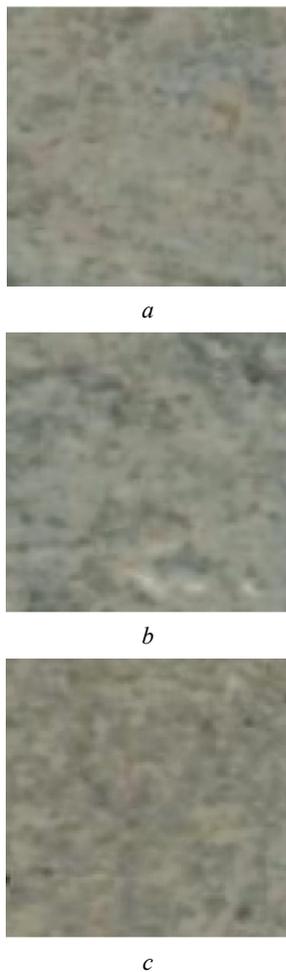


Рис. 4. Изображения состава 8
Fig. 4. Images of composition 8

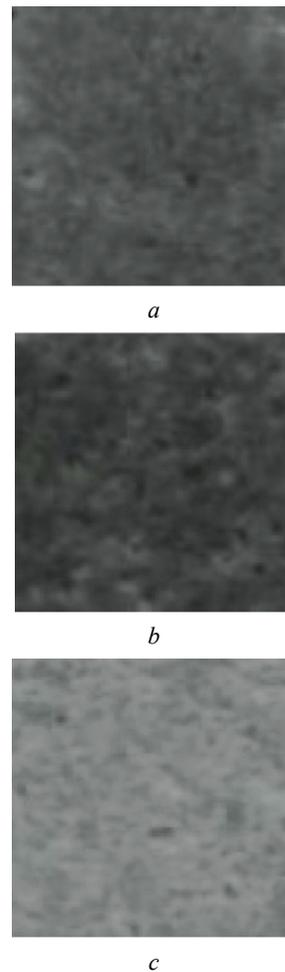


Рис. 5. Изображения состава T17
Fig. 5. Images of composition T17

С использованием метода кластерного анализа исследуемые образцы могут быть ранжированы по величине введенных метрик, что позволит их разделить на классы и выбрать из них наиболее стойкие к соле-

образованию на поверхности материала в неблагоприятных условиях экспонирования. Это можно выполнить для каждой из двух групп образцов цементных композитов, характеризующихся метриками D1 и D2.

Табл. 4. Содержание компонентов в составах первой группы

Table 4. The content of components in the 1st group compositions

Номер состава Composition number	Цемент ульяновский ПЦ500 Д0 Cement Ulyanovsk PC500 D0	Вода Water	ГП Melflux 1641F GP Melflux 1641F	СП «Фортрайс™» Стронг JV «Fortress TM» Strong	СП Хидетал-П-5 JV Hidetal-P-5	Микрокремнезем Microsilica	Песок молотый (микрокварц) Ground sand (microquartz)	Песок, фракция 0-0,63 мм Sand, grain size 0-0.63 mm	Песок, фракция 0,63-2,5 мм Sand, fraction 0.63-2.5 mm
1	1	0,267	—	—	—	—	—	—	—
2	1	0,35	—	—	—	—	—	—	—
3	1	0,171	0,009	—	—	—	—	—	—
4	1	0,56	0,009	—	—	—	1,1	2,753	2,347
5	1	0,475	0,009	—	—	0,1	0,75	1,775	1,975
6	1	0,525	0,009	—	—	—	—	2,065	1,76
7	1	0,56	0,009	—	—	—	—	2,51	2,14
8	1	0,56	—	—	0,012	—	0,825	2,065	1,76
9	1	0,261	—	0,0151	—	—	—	—	—
10	1	0,289	—	—	0,0151	—	—	—	—

Табл. 5. Содержание компонентов в составах второй группы

Table 5. The content of components in the 2nd group compositions

Имена составов Squad names	Цемент ульяновский ПЦ500 Д0 Cement Ulyanovsk PC500 D0	Вода Water	ГП Melflux 5581 GP Melflux 5581	Микрокремнезем Microsilica	Песок молотый (микрокварц) Ground sand (microquartz)	Песок, фракция 0,63-2,5 мм Sand, fraction 0.63-2.5 mm	Биоцидная добавка Biocidal additive			
							MultiDEZ Дезинфектант MultiDEZ Disinfectant	Teflex Универсальный Teflex Universal	Ультрадез-Био Ultradez Bio	Тефлекс- Анти-плесень Teflex-Anti-mold
T1	1	0,267	—	—	—	—	—	—	—	—
T2	1	0,267	—	—	—	—	0,03	—	—	—
T3	1	0,267	—	—	—	—	—	0,03	—	—
T5	1	0,35	—	—	—	—	—	—	—	—
T6	1	0,35	—	—	—	—	0,03	—	—	—
T8	1	0,35	—	—	—	—	—	—	0,03	—
T9	1	0,195	0,009	—	—	—	—	—	—	—
T17	1	0,267	—	—	—	—	—	—	—	0,03

Табл. 6. Содержание компонентов в составах третьей группы

Table 6. Content of components in the 3rd group compositions

Имена составов Squad names	Цемент ульяновский ПЦ500 Д0 Cement Ulyanovsk PC500 D0	Вода неактивированная Non-activated water	Вода, активированная по режиму Э + М (1-1) Water activated according to the E + M mode (1-1)	Вода, активированная по режиму Э + М (3-3) Water activated in the E + M mode (3-3)	Вода, активированная по режиму Э + М (6-6) Water activated in the E + M mode (6-6)
M0	1	0,267	—	—	—
M1	1	—	0,264	—	—
M3	1	—	—	0,260	—
M6	1	—	—	—	0,264

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе приемов и методов цифровой обработки изображений разработана инженерная методика оценки солеобразования на поверхности цементных композитов, прошедших экспонирование в неблагоприятных условиях эксплуатации. Приведены основные расчетные формулы для вычисления числовых метрик, характеризующих степень солеобразования на поверхности цементных композитов. Расчеты выполнены на основе предположения, что степень солеобразования отображается изменением цветовых характеристик отсканированных образцов в сторону смещения к белому цвету.

Предложенная методика может быть использована в случаях, когда имеется не менее трех отсканированных образцов одного и того же испытуемого объекта исследования, в первую очередь строительных материалов.

К перспективе развития рассматриваемой темы можно отнести классификацию рассматриваемых и других цементных композитов по стойкости к высаливанию на поверхности образцов в неблагоприятных условиях экспонирования в зависимости от состава и введенных добавок. В то же время авторы считают, что в направлении проведенных исследований есть еще нерешенные вопросы, и готовы рассмотреть замечания и предложения в свой адрес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nasir M., Baghabra Al-Amoudi O.S., Maslehuddin M. Effect of placement temperature and curing method on plastic shrinkage of plain and pozzolanic cement concretes under hot weather // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 152. Pp. 943–953. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.068
2. Ерофеева И.В., Федорцов В.А., Афонин В.В., Емельянов Д.В., Подживотов Н.Ю., Моисеев В.В. и др. Исследования влияния циклически действующих отрицательных и положительных температур на демпфирующие свойства цементных композитов // *Chemical Bulletin*. 2018. Т. 1. № 3. С. 42–51.
3. Shi C., Wu Z., Cao Z., Ling T.C., Zhang J. Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry // *Cement and Concrete Composites*. 2018. Vol. 86. Pp. 130–138. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.10.013
4. Rao D.D.V.P., Narayana N.L. Properties of multi component composite cement concrete // *International Journal of Engineering Research and General Science*. 2017. Vol. 5. Issue 1. P. 54–61.
5. Shi C., Li Y., Zhang J., Li W., Chong L., Xie Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate — A review // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 112. Pp. 466–472. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.08.057
6. Ермилова Е.Ю., Камалова З.А., Рахимов Р.З., Щелконогова Я.В. Определение состава продуктов гидратации композиционного цементного камня с комплексной добавкой термоактивированной полиминеральной глины и известняка // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 4 (42). С. 289–295.
7. Береговой А.М., Береговой В.А. Температурно-влажностное состояние наружных ограждений в условиях фазовых переходов влаги и агрессивных воздействий среды // *Региональная архитектура и строительство*. 2017. № 3. С. 99–104.
8. Перехоженцев А.Г., Груздо И.Ю. Температурно-влажностное состояние поверхностных слоев наружных ограждающих конструкций зданий // *Бюллетень строительной техники*. 2016. № 6 (982). С. 70–71.
9. Mukesh K., Singh S.K., Singh N.P., Singh N.B. Hydration of multicomponent composite cement: OPC-FA-SF-MK // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 36. Pp. 681–686. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.055

10. Ramezaniapour A.A., Peydayesh M., Nadoushan M.J. De-icing salt scaling resistance of concrete containing new composite cement // Conference: XXI Nordic Concrete research Symposium. Hämeenlinna, Finland. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/323337594_De-icing_Salt_Scaling_Resistance_of_Concrete_Containing_New_Composite_Cement
11. Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф. Влажностный режим помещений зданий при наличии в материале стен гигроскопических солей // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 12 (720). С. 62–74.
12. Farnam Y., Washington T., Weiss J. The influence of calcium chloride salt solution on the transport properties of cementitious materials // Advances in Civil Engineering. 2015. Vol. 2015. Pp. 1–13. DOI: 10.1155/2015/929864
13. Durability of concrete and cement composites / ed. by C.L. Page and M.M. Page. Woodhead Publishing Limited, 2007. 415 p.
14. Cai J., Luo J., Wang S., Yang S. Feature selection in machine learning: A new perspective // Neurocomputing. 2018. Vol. 300. Pp. 70–79. DOI: 10.1016/j.neucom.2017.11.077
15. Palchikova I.G., Smirnov E.S., Palchikov E.I. Quantization noise as a determinant for color thresholds in machine vision // Journal of the Optical Society of America A. 2018. Vol. 35. Issue 4. P. B214. DOI: 10.1364/JOSAA.35.00B214
16. Черушова Н.В., Митина Е.А., Касимкина М.М., Афонин В.В., Ерофеев В.Т. Оценка изменения декоративных свойств лакокрасочных материалов под воздействием эксплуатационных факторов // Вестник Мордовского университета. 2008. № 4. С. 124–127.
17. Афонин В.В., Ерофеева И.В., Зоткина М.М., Емельянов Д.В., Поджиготов Н.Ю. Эталонная оценка качества изображений композиционных материалов, подверженных воздействию положительных и отрицательных температур // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 1. С. 83–93. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.83-93
18. Ефлов В.Б., Копарев В.С., Васильев С.Б. Разработка метода оптического анализа изображения поверхности образца древесно-цементного композита // Resources and Technology. 2014. Т. 11. № 1. С. 77–110. DOI: 10.15393/j2.art.2014.2841
19. Демин О.В., Смолин Д.О., Першин В.Ф. Оценка качества смеси сыпучих материалов на основе анализа их цифровых изображений // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 157.
20. Бабкин П.С., Павлов Ю.Н. Анализ и сравнение объективных методов оценки качества изображений // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 9. С. 203–215. DOI: 10.7463/0914.0726368
21. Сидоров Д.В. К вопросу оценки качества множества восстановленных изображений // Прикладная информатика. 2008. № 4 (16). С. 92–95.
22. Yeganeh H., Wang Z. Objective quality assessment of tone-mapped images // IEEE Transactions on Image Processing. 2013. Vol. 22. Issue 2. Pp. 657–667. DOI: 10.1109/tip.2012.2221725
23. Gu K., Zhou J., Zhai G., Lin W., Bovik A.C. No-reference quality assessment of screen content pictures // IEEE Transactions on Image Processing. 2017. Vol. 26. Issue 8. Pp. 4005–4017. DOI: 10.1109/tip.2017.2711279
24. Старовойтов В.В., Старовойтов Ф.В. Сравнительный анализ безэталонных мер оценки качества цифровых изображений // Системный анализ и прикладная информатика. 2017. № 1. С. 24–32.
25. Mahdi A., Su M., Schlesinger M., Qin J. A comparison study of saliency models for fixation prediction on infants and adults // IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems. 2018. Vol. 10. Issue 3. Pp. 485–498. DOI: 10.1109/TCDS.2017.2696439
26. Suhas S., Venugopal C.R. An efficient MRI noise removal technique using linear and nonlinear filters // International Journal of Computer Applications. 2018. Vol. 179. Issue 15. Pp. 17–20. DOI: 10.5120/ijca2018915777
27. Wang W., Shen J. Deep visual attention prediction // IEEE Transactions on Image Processing. 2018. Vol. 27. Issue 5. Pp. 2368–2378. DOI: 10.1109/tip.2017.2787612
28. Мусеев А.А. Апостериорное сопровождение элементов групповой цели // Радиопромышленность. 2020. Т. 30. № 2. С. 25–31. DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-2-25-31
29. Денисова А.Ю., Сергеев В.В. Алгоритмы построения гистограмм многоканальных изображений с использованием иерархических структур данных // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 4. С. 535–542. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-535-542
30. Дольник А.С. Активный метод построения гистограмм оценки селективности при строковых запросах XML // Стохастическая оптимизация в информатике. 2006. Т. 2. С. 176–189.
31. Ma J., Fan X., Yang S.X., Zhang X., Zhu X. Contrast limited adaptive histogram equalization based fusion for underwater image enhancement. 2017. 2017030086. DOI: 10.20944/preprints201703.0086.v1
32. Sharma V. Analysis of contrast enhancement effects on histogram // H&ES Research. 2017. Vol. 9. № 1. Pp. 60–66.

Поступила в редакцию 17 августа 2020 г.

Принята в доработанном виде 12 ноября 2020 г.

Одобрена для публикации 20 ноября 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владимир Трофимович Ерофеев** — доктор технических наук, профессор, академик РААСН, декан архитектурно-строительного факультета, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 161483, Scopus: 56662851300, ResearcherID: A-7827-2017, ORCID: 0000-0001-8407-8144; fac-build@adm.mrsu.ru;

Виктор Васильевич Афонин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 101166, ORCID: 0000-0001-7976-9792; vvafonin53@yandex.ru;

Татьяна Федоровна Ельчищева — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектуры и строительства зданий; **Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ)**; 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106; РИНЦ ID: 318240, ORCID: 0000-0002-0241-3808; elschevat@mail.ru;

Марина Михайловна Зоткина — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 572405, ORCID: 0000-0001-6095-5667; zotkina.mm@yandex.ru;

Ирина Владимировна Ерофеева — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры геодезии, картографии и геоинформатики; **Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева)**; 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68; РИНЦ ID: 761852; ira.erofeeva.90@mail.ru.

REFERENCES

1. Nasir M., Baghabra Al-Amoudi O.S., Maslehuddin M. Effect of placement temperature and curing method on plastic shrinkage of plain and pozzolanic cement concretes under hot weather. *Construction and Building Materials*. 2017; 152:943-953. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.068
2. Erofeeva I.V., Fedortsov V.A., Afonin V.V., Emelyanov D.V., Podzhivotov N.Yu., Moiseev V.V. et al. Studies of the influence of cyclically acting negative and positive temperatures on the damping properties of cement composites. *Chemical Bulletin*. 2018; 1(3):42-51. (rus.).
3. Shi C., Wu Z., Cao Z., Ling T.C., Zhang J. Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry. *Cement and Concrete Composites*. 2018; 86:130-138. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.10.013
4. Rao D.D.V.P., Narayana N.L. Properties of multi component composite cement concrete. *International Journal of Engineering Research and General Science*. 2017; 5(1):54-61.
5. Shi C., Li Y., Zhang J., Li W., Chong L., Xie Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate — A review. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 112:466-472. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.08.057
6. Ermilova E.Yu., Kamalova Z.A., Rakhimov R.Z., Shchelkonogova Ya.V. Hydration products composition of blended cement stone with a complex additive calcined polymineral clay and limestone. *Proceedings of the Kazan state University of architecture and construction*. 2017; 4(42):289-295. (rus.).
7. Beregovoy A.M., Beregovoy V.A. Temperature and humidity state of external fences in conditions of phase transitions of moisture and aggressive environmental influences. *Regional Architecture and Construction*. 2017; 3:99-104. (rus.).
8. Perekhozhentsev A.G., Gruzdo I.Yu. Temperature and humidity state of surface layers of external building envelope. *Bulletin of Construction Equipment*. 2016; 6(982):70-71. (rus.).
9. Mukesh K., Singh S.K., Singh N.P., Singh N.B. Hydration of multicomponent composite cement: OPC-FA-SF-MK. *Construction and Building Materials*. 2012; 36:681-686. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.055
10. Ramezani pour A.A., Peydayesh M., Nadoushan M.J. De-icing salt scaling resistance of concrete containing new composite cement. *Conference: XXI Nordic Concrete research Symposium*. Hämeenlinna, Finland, 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/323337594_De-icing_Salt_Scaling_Resistance_of_Concrete_Containing_New_Composite_Cement
11. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F. Wettime mode of building premises in the existence of hygroscopic salts in the material of the walls. *News of higher educational institutions. Construction*. 2018; 12(720):62-74. (rus.).

12. Farnam Y., Washington T., Weiss J. The influence of calcium chloride salt solution on the transport properties of cementitious materials. *Advances in Civil Engineering*. 2015; 2015:1-13. DOI: 10.1155/2015/929864
13. *Durability of concrete and cement composites* / ed. by C.L. Page and M.M. Page. Woodhead Publishing Limited. 2007; 415.
14. Cai J., Luo J., Wang S., Yang S. Feature selection in machine learning: A new perspective. *Neurocomputing*. 2018; 300:70-79. DOI: 10.1016/j.neucom.2017.11.077
15. Palchikova I.G., Smirnov E.S., Palchikov E.I. Quantization noise as a determinant for color thresholds in machine vision. *Journal of the Optical Society of America A*. 2018; 35(4):B214. DOI: 10.1364/JOSAA.35.00B214
16. Cherushova N.V., Mitina E.A., Kasimkina M.M., Afonin V.V., Erofeev V.T. Assessment of changes in decorative properties of paint materials under the influence of operational factors. *Bulletin of the Mordovian University*. 2008; 4:124-127. (rus.).
17. Afonin V.V., Erofeeva I.V., Zotkina M.M., Emelyanov D.V., Podzhivotov N.Yu. Reference image quality assessment of composite materials exposed to positive and negative temperatures. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(1):83-93. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.83-93 (rus.).
18. Eflor V.B., Koparev V.S., Vasilyev S.B. Development of technique of wood-cement composite surface optical image data analysis. *Resources and Technology*. 2014; 11(1):77-110. DOI: 10.15393/j2.art.2014.2841 (rus.).
19. Demin O.V., Smolin D.O., Pershin V.F. Qualification mixes bulk materials based on their digital images. *Modern problems of science and education*. 2013; 2:157. (rus.).
20. Babkin P.S., Pavlov Yu.N. Analysis and comparison of objective methods of image quality assessment. *Science and education: scientific publication of Bauman Moscow state technical University*. 2014; 9:203-215. DOI: 10.7463/0914.0726368 (rus.).
21. Sidorov D.V. On the issue of assessing the quality of many restored images. *Applied Informatics*. 2008; 4(16):92-95. (rus.).
22. Yeganeh H., Wang Z. Objective quality assessment of tone-mapped images. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2013; 22(2):657-667. DOI: 10.1109/tip.2012.2221725
23. Gu K., Zhou J., Zhai G., Lin W., Bovik A.C. No-reference quality assessment of screen content pictures. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2017; 26(8):4005-4017. DOI: 10.1109/tip.2017.2711279
24. Starovoitov V.V., Starovoitov F.V. Comparative analysis without reference measures for evaluating the quality of digital images. *System analysis and applied Informatics*. 2017; 1:24-32. (rus.).
25. Mahdi A., Su M., Schlesinger M., Qin J. A comparison study of saliency models for fixation prediction on infants and adults. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*. 2018; 10(3):485-498. DOI: 10.1109/TCDS.2017.2696439
26. Suhas S., Venugopal C.R. An efficient MRI noise removal technique using linear and nonlinear filters. *International Journal of Computer Applications*. 2018; 179(15):17-20. DOI: 10.5120/ijca2018915777
27. Wang W., Shen J. Deep visual attention prediction. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2018; 27(5):2368-2378. DOI: 10.1109/tip.2017.2787612
28. Moiseev A.A. A posteriori support of group goal elements. *Radio Industry*. 2020; 30(2):25-31. DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-2-25-31 (rus.).
29. Denisova A.Y., Sergeev V.V. Algorithms for calculating multichannel image histogram using hierarchical data structures. *Computer Optics*. 2016; 40(4):535-542. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-535-542 (rus.).
30. Dolnik A.S. Active method for constructing histograms for evaluating selectivity in XML string queries. *Stochastic Optimization in Information*. 2006; 2:176-189. (rus.).
31. Ma J., Fan X., Yang S.X., Zhang X., Zhu X. Contrast limited adaptive histogram equalization based fusion for underwater image enhancement. 2017; 2017030086. DOI: 10.20944/preprints201703.0086.v1
32. Sharma V. Analysis of contrast enhancement effects on histogram. *H&ES Research*. 2017; 9(1):60-66.

Received August 17, 2020.

Adopted in revised form on November 12, 2020.

Approved for publication on November 20, 2020.

B I O N O T E S : **Vladimir T. Erofeev** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Dean of the Faculty of Architecture and Civil Engineering, Head of the Department of Building Materials and Technologies; **National Research Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RISC: 161483, Scopus: 56662851300, ResearcherID: A-7827-2017, ORCID: 0000-0001-8407-8144; fac-build@adm.mrsu.ru;

Victor V. Afonin — Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of Department of Automated Systems of Information Processing and Management; **National Research Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RISC: 101166, ORCID: 0000-0001-7976-9792; vvafonin53@yandex.ru;

Tatiana F. Elchishcheva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architecture and Construction of Buildings; **Tambov State Technical University (TSTU)**; 106 Sovetskaya st., Tambov, 392000, Russian Federation; ID RISC: 318240, ORCID: 0000-0002-0241-3808; elschevat@mail.ru;

Marina M. Zotkina — Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Materials and Technologies; **National Research Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RISC: 572405, ORCID: 0000-0001-6095-5667; zotkina.mm@yandex.ru;

Irina V. Erofeeva — Candidate of Technical Science, Senior Lecturer of the Department of Geodesy, Cartography and Geoinformatics; **National Research Ogarev Mordovia State University**; 68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russian Federation; ID RISC: 761852; ira.erofeeva.90@mail.ru.

Исследование сорбционных свойств брикетированного торфа для очистки сточных вод от ионов кадмия, свинца и меди

Б.Н. Житенев¹, А.Д. Гуринович², Д.Д. Сенчук¹

¹ Брестский государственный технический университет (БрГТУ); г. Брест, Республика Беларусь;

² Белостокский технический университет; г. Белосток, Польша

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время ведутся активные исследования: методов очистки сточных вод от таких токсичных металлов, как кадмий, свинец, медь и др., с применением новых композиционных сорбентов; по совершенствованию ионообменной очистки, осаждению, например, в виде сульфидов или оксалатов; сорбцией золой от сжигания древесины; биосорбцией растениями. Одно из перспективных направлений — применение технологий сорбционной очистки сточных вод с использованием торфа. Наличие в Республике Беларусь значительных запасов торфа создает реальные предпосылки для выпуска дешевых, экологически безопасных сорбентов на основе модифицированного брикетированного торфа. Цель исследования — изучение сорбционных свойств брикетированного торфа для очистки сточных вод от ионов кадмия, свинца и меди.

Материалы и методы. Используются физико-химические, технологические, математические методы.

Результаты. Выполнены исследования кинетики сорбции брикетированным торфом ионов Cd^{+2} , Pb^{+2} и Cu^{+2} . Установлено, что с увеличением крупности зерен брикетированного торфа эффективность сорбции снижается. Процесс сорбции протекает интенсивно: в течение первых 5 мин из раствора извлекаются ионы Cd^{+2} , Pb^{+2} и Cu^{+2} , соответственно 91,11; 96,96 и 88,39 %. За 20 мин степень достижения равновесия составила $F = 0,98$ для Cd^{+2} и Pb^{+2} и $F = 0,96$ для Cu^{+2} , а при продолжительности процесса 40 мин для всех ионов $F = 0,99$. Кратность извлечения — отношение исходной концентрации к равновесной составило для ионов Cd^{+2} — 114, Pb^{+2} — 162, Cu^{+2} — 93. Сорбционная емкость при насыщении: по Cd^{+2} — 0,0778 мМоль/г (8,75 мг/г), по Pb^{+2} — 0,8205 мМоль/г (170,00 мг/г), по Cu^{+2} — 2,707 мМоль/г (172 мг/г). С помощью уравнений диффузионной и химической кинетики определено, что процесс сорбции идет в диффузионном режиме, при этом вклад в общую скорость процесса вносит стадия химического взаимодействия ионов металла с функциональными группами торфа.

Выводы. Брикетированный торф является эффективным сорбентом для очистки сточных вод от ионов Cd^{+2} , Pb^{+2} и Cu^{+2} . Процесс сорбции практически заканчивается через 20 мин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: брикетированный торф, ионы Cd^{+2} , Pb^{+2} , Cu^{+2} , сточные воды, диффузионная и химическая кинетика

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Житенев Б.Н., Гуринович А.Д., Сенчук Д.Д. Исследование сорбционных свойств брикетированного торфа для очистки сточных вод от ионов кадмия, свинца и меди // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 11. С. 1534–1545. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1534-1545

A research into sorption properties of peat briquettes used to remove ions of cadmium, lead and copper from wastewaters

Barys N. Zhytsianiou¹, Anatoli D. Hurynovich², Darya D. Sianchuk¹

¹ Brest State Technical University (BrSTU); Brest, Republic of Belarus;

² Bialystok University of Technology; Bialystok, Poland

ABSTRACT

Introduction. At present, the following areas are the subject of intensive research: methods for removing such toxic metals as cadmium, lead, copper, etc. from wastewaters, namely, using new composite sorbents for this purpose; improvement of ion exchange treatment and, for example, sedimentation of sulphides or oxalates; wood ash sorption; biosorption onto plants. It is a future-oriented trend to use peat as a sorbent in a wastewater treatment technology. Extensive peat deposits in the Republic of Belarus can contribute to production of cheap, environmentally friendly sorbents made of modified peat briquettes. The mission of this work is to study the sorption properties of peat briquettes used to remove cadmium, lead and copper ions from wastewater.

Materials and methods. Physicochemical, technological, mathematical methods are employed.

Results. The co-authors studied the kinetics of cadmium Cd^{+2} , lead Pb^{+2} , and copper Cu^{+2} ions sorption onto peat briquettes. They identified that the bigger the grain of peat briquettes, the less efficient the sorption. The sorption process is intensive: it takes cadmium Cd^{+2} , lead Pb^{+2} , and copper Cu^{+2} ions five minutes to get extracted from the solution; extraction efficiency reaches 91.11; 96.96 and 88.39 %, respectively. 20 minutes is enough to reach degree of equilibrium $F = 0.98$ for cadmium Cd^{+2} and lead Pb^{+2} and $F = 0.96$ for copper Cu^{+2} . F is equal to 0.99 for all ions in 40 minutes. The multiplicity of extraction, or the ratio of initial concentration to equilibrium concentration reaches 114 for cadmium ions Cd^{+2} , 162 for lead ions Pb^{+2} , and

93 for copper ions Cu^{+2} . In case of saturation, sorption capacity reaches the following values: Cd^{+2} — 0,0778 mmol/g (8.75 mg/g), Pb^{+2} — 0.8205 mmol/g (170.00 mg/g), Cu^{+2} — 2.707 mmol/g (172 mg/g). The co-authors used equations of diffusion and chemical kinetics to establish that the sorption process proceeds in the diffusion mode, and the stage of chemical interaction of metal ions with functional groups of peat contributes to the overall velocity of the process.

Conclusions. Peat briquettes represent an effective sorbent used to remove cadmium Cd^{+2} , lead Pb^{+2} , and copper Cu^{+2} ions from wastewater. The sorption process is almost over in 20 minutes.

KEYWORDS: peat briquettes, cadmium Cd^{+2} , lead Pb^{+2} , copper Cu^{+2} ions, wastewater, diffusion and chemical kinetics

FOR CITATION: Zhytsianiou B.N., Hurynovich A.D., Sianchuk D.D. A research into sorption properties of peat briquettes used to remove ions of cadmium, lead and copper from wastewaters. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(11):1534-1545. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1534-1545 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Одними из опаснейших стойких загрязнений водных объектов являются загрязнения ионами тяжелых металлов (ТМ): кадмия, свинца, меди, железа, марганца, никеля и цинка. Наиболее токсичные металлы — кадмий и свинец.

Кадмий широко используется в промышленности в качестве защитного покрытия металлов от коррозии, имеет преимущество перед цинковыми, никелевыми или оловянными, так как при деформации не отслаивается. Сплавы кадмия с незначительными добавками меди, никеля и серебра применяют для изготовления подшипников автомобильных, авиационных и судовых двигателей. Никель-кадмиевые аккумуляторы применяются в мобильных телефонах и прочих электронных устройствах. Используется этот металл также в производстве пластика, красок, металлических покрытий. Почвы, которые регулярно удобряют, также могут содержать такой токсичный металл в большом количестве. Кадмий, а также его соединения характеризуются как канцерогенные вещества. В последнее время многими исследованиями подтверждено увеличивающееся загрязнение водных объектов кадмием. В работе [1] отмечается, что в Чили при добыче медной руды дренажные шахтные воды с содержащимися в них металлами поступают в прибрежную морскую акваторию и скапливаются в донных отложениях (ДО), тем самым загрязняя пляжи и прибрежные зоны. Взятые из двух точек пробы в ДО показали наличие кадмия, меди, железа, марганца, никеля, свинца и цинка с общим содержанием сухой массы 7,2–985 и 23–746 мкг/г. При этом установлено, что содержание металлов отрицательно сказывается на состоянии обитателей бентоса, поскольку происходит их аккумуляция биомассой. Было проведено измерение комплексобразования цинка и кадмия с природными органическими лигандами в субантарктических водах к востоку от Новой Зеландии [2]. Показано, что общая концентрация растворенных Zn и Cd находится в пиколярном диапазоне, и концентрация лигандов для обоих металлов составляет 1–2,5 нмоль/кг. Выявлено, что накопление цинка в фитопланктоне намного ниже, чем кадмия, что, вероятно, связано с возможностью его утилизации или предпочтением поглоще-

ния других металлов. В труде [3] приведена характеристика экосистемы, обследовался залив, расположенный в урбанизированной зоне с большим количеством промышленных производств, где наблюдалась массовая гибель рыбы и моллюсков. Как выяснилось, эти явления происходили одновременно с формированием в заливе крупных скоплений водорослей, среди которых были выделены четыре вида, способных синтезировать токсиканты, которые затем поступали в воду. В ходе исследований установлено, что в месте скоплений ДО содержали кадмий, медь, цинк, свинец и ртуть в повышенных концентрациях, в частности, содержание кадмия и свинца более чем в 6 раз превышало показатели для окружающих участков, а ткани моллюсков содержали кадмий в концентрациях, в 8 раз больших, чем экземпляры, отобранные на удалении. Приведены результаты обследований участка речной системы протяженностью 180 км (до эстуария в месте впадения в Атлантический океан), свидетельствующие, что уровень загрязненности воды имеет сезонные колебания в связи с изменениями расхода речной воды [4]. В воде определялись металлы семи видов, биогенные элементы и другие пробы воды отбирались в 43 точках. В начале контролируемого участка, находящегося в урбанизированной зоне, содержание свинца достигало 520 пмоль, серебра 330 пмоль, а на протяженности всего участка до эстуария медь составляла до 40 нмоль, никель и цинк до 59–63 нмоль, кадмий до 350 пмоль. Для характеристики загрязнения поверхностных водотоков тяжелыми металлами в исследовании [5] были выбраны кадмий, медь, никель, ртуть, хром, цинк, свинец, а также мышьяк. Анализ хронологии годовых концентраций металлов в воде не выявил каких-либо закономерностей: они колеблются беспорядочно, не прослеживается параллелизма в годовых изменениях концентраций различных металлов. Внутри года не установлены закономерности в изменении концентраций ТМ в отдельных пробах. Предложен комплексный коэффициент загрязнения воды тяжелыми металлами. В работе [6] обследовалась река на протяжении 12 км с небольшим расходом, которая протекала по участкам с различной загруженностью промышленными предприятиями, в ее донных отложениях в 15 точках определялось содержание различных металлов: кадмий содер-

жался в концентрациях от 0,17 до 1,34 мкг/г; хром от 28,9 до 90 мкг/г; медь от 23,2 до 76,7 мкг/г; никель от 41,8 до 61,6 мкг/г и свинец от 18 до 53 мкг/г. Сообщается [7], что входящий в состав мха вид *Fontinalis dalecarlica* (1) отличается повышенной способностью к биоаккумуляции ТМ, в связи с чем применяется при мониторинге природных водных сред, обитает на заболоченных местностях, на линиях раздела река/берег, озеро/берег и т.д. В лабораторных условиях исследовался процесс аккумуляции кадмия биомассой, эксперимент проводился с использованием аквариума 35 л, подача воды — 0,6 л/мин, скорость потока — 0,2 м/с. Дозы кадмия в опытах составляли 0,5; 1,0 и 5,0 мкг/л. Установлено, что кадмий сорбировался с большой скоростью в течение 5 сут, затем скорость уменьшалась и через 30 сут сорбция прекращалась. Сорбционная емкость биомассы для названных доз кадмия 336, 496 и 2390 нмоль/г сухой биомассы, после перенесения 1 в воду, не содержащую кадмия, десорбция практически не наблюдалась. Отмечается [8], что в настоящее время вода природных источников, наряду с другими загрязнителями, содержит также ионы ТМ. В лабораторных условиях исследовалась возможность оценки их содержания путем измерения количеств, аккумулированных биомассой зеленых водорослей. В опытах использовался природный (так называемый «дикий») вид (В1) и специально селективированный (В2); модельным загрязнителем являлся кадмий в концентрациях от 5–10⁻¹⁰ до 5–10⁻⁴ моль. Установлено, что в естественных условиях кадмий образует комплексы с лигандами, что влияет на процессы сорбции/десорбции, сорбционная емкость по кадмию для В1 в 2–3 раза выше, чем для В2, присутствие в растворе молибдена, марганца, меди, кобальта, цинка, никеля и свинца ингибирует процессы сорбции кадмия В1 и В2; магний и железо на эти процессы не влияют. Данные работ [1–8] свидетельствуют о том, что загрязнение водных объектов тяжелыми металлами, в частности кадмием, свинцом, медью и железом, носит глобальный характер.

МЕТОДЫ ОЧИСТКИ

Для извлечения из водных растворов кадмия, меди, никеля, цинка [9] использовался композиционный сорбент. Его приготовление проводилось по методике, суть которой — образование в порах катионита Dowex Marathon C в Na-форме (аналог универсального катионита КУ-2х8) сорбционно-активной фазы гидроксида железа. Тем самым достигалось создание высокоразвитой поверхности сорбента. В качестве исходных для сорбции служили 0,01 н. растворы CuSO₄, NiSO₄, CdSO₄, ZnSO₄. По возрастанию сорбируемости в растворах с рН 5,4–5,7 металлы расположены в ряд: Cd, Zn, Ni, Cu. Отмечается [10], что методы сорбции ТМ на ионообмен-

ных смолах широко используются в технологиях водоподготовки. В исследовании [11] констатируется, что кадмий находит применение в различных изделиях, например, он используется в производстве аккумуляторов и в различных технологиях, при этом образуются хлорсодержащие системы, в состав которых входит также кадмий, в приводимом примере это — CdCl₂·4H₂O, данные комплексы отличаются высокой стойкостью. Предлагается экстрагировать из этих систем кадмий с использованием гидрофобных никотинамидов, в рассматриваемом случае это — N,N-дигексилпиридин-3-карбоксамид (I). В приводимом примере содержание (I) составляло 1–50 ммоль и HCl 0,1–2,5 моль, в оптимальном варианте содержание Cd²⁺ в органической фазе достигало 640 мг/моль. Метод осаждения кадмия, железа, урана, меди, хрома, никеля, цинка, кобальта предлагается в работе [12], он состоит в том, что в воду дозируют органическое соединение никотинамидадениндинуклеотид в качестве донора электронов, при его участии сульфатредуцирующие бактерии восстанавливают сульфаты до сульфидов, далее в последовательности реакций происходит образование нерастворимых сульфидов металлов, например, это CdS. Сообщается об успешном применении метода. В лабораторных условиях [13] исследовалась возможность удаления из ДО ТМ методом электродиализа. Реальные ДО содержали медь, цинк, свинец и кадмий в концентрациях 634; 1192; 478 и 16,6 мг/кг сухой массы. В оптимальном варианте эффективность удаления по этим компонентам составила 88; 98; 94 и 99 % соответственно. В ходе экспериментов [14] изучалась возможность сорбционного удаления ТМ (свинец 3,8–4,9 мг/л, кадмий 5,0–5,3 мг/л, цинк 47,5–49,1 мг/л, железо до 600 мг/л и кальций до 448 мг/л) из дренажных шахтных вод с использованием природных цеолитов (ЦЛ), обладавших ионообменными свойствами, этот выбор обусловлен, в том числе устойчивостью ЦЛ в кислых средах, их разрушение наблюдается только при рН ниже 2. В лабораторных экспериментах при рН 2,24 и дозе ЦЛ 20 г/л (гранулят 1–2,5 мм) свинец удалялся полностью, с наименьшей эффективностью удалялось железо, присутствие ионов кальция ингибировало процессы сорбции ТМ. Приведены результаты лабораторных экспериментов по удалению из СВ ионов кадмия путем перевода их в форму оксалата кадмия в ходе воздействия на модельные СВ щавелевой кислотой. Сообщается, что оксалат кадмия обладает чрезвычайно низкой растворимостью, в экспериментах содержание Cd²⁺ в СВ составляло 5–6 г/л, при дозе щавелевой кислоты, в 2 раза превышающей концентрацию насыщения, кадмий удалялся с эффективностью более 99 % при рН не ниже 4,5. В работе [15] отмечается, что при производстве сахара с использованием в качестве сырья сахарной свеклы на стадии варки пульпы выделялись СВ, содержащие галакту-

роновую кислоту 20 %, соединения, включавшие карбоновые группы 0,466 мг/л, также тяжелые металлы. Для первичной обработки этих СВ применялся дешевый сорбент, изготовленный из отходов от производства сахара, основной целью являлось удаление тяжелых металлов. Установлено, что при сорбции тяжелых металлов их сродство к сорбенту уменьшалось в следующем порядке: Pb^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , для приведенного порядка металлов сорбционная емкость сорбента изменялась от 0,202 до 0,356 ммоль/г. СВ с сорбентами находились в реакторе 1 л, включенном в контур циркуляции с мембраной для микрофильтрации, ТМ удалялись с эффективностью не ниже 90 %, кадмий и свинец на 100 % в течение 10 ч. Для удаления ТМ чаще всего применяются сорбенты, коммерческие марки которых имеют весьма высокую стоимость. В лабораторных экспериментах в качестве альтернативных сорбентов применялась зола от сжигания древесины (ЗД) и известь. Модельными ТМ являлись Cd, Cu, Pb и Zn в концентрациях от 25 до 1500 мг/л. Установлено, что ЗД как сорбент более эффективна, чем известь, с ее применением наиболее эффективно удаляется свинец (сорбционная емкость 101 мг Pb/г ЗД), затем следуют медь (6,92 мг/г), кадмий (5,03 мг/г) и цинк (4,12 мг/г). При дозе ЗД 20 г/л и содержании ТМ 100 мг/л эффективность их удаления составляла от 92 до 100 % [16]. В исследованиях [17] указывается, что при обработке осадков и СВ, содержащих тяжелые металлы, достаточно широко используются методы биосорбции, при которых удаление ТМ осуществляется аккумуляцией биомассой растений, при этом известны виды растений, способных к так называемой гипераккумуляции. Проблемой при этом является накопление биомассы, загрязненной ТМ, в лабораторных экспериментах исследовалась возможность сжигания массы растений с переводом металлов в золу. Использовались растения четырех видов, определен вид, обладающий наибольшей эффективностью, при этом зола от его сжигания содержала цинк 9326 мг/кг сухой массы, свинец 18 мг/кг, кадмий 224 мг/кг и т.д.

Таким образом, исследования по удалению из сточных вод таких токсичных металлов, как кадмий, свинец, медь и др., ведутся в следующих направлениях: разработка новых композиционных сорбентов, совершенствование ионообменной очистки, осаждение, например, в виде сульфидов или оксалатов, сорбция золой от сжигания древесины, биосорбция растениями [9–17]. В работах [18–35] приведены результаты исследований по очистке сточных вод от ионов ТМ путем использования модификаций природного торфа.

Обзор литературных данных позволяет сделать вывод о том, что разработка усовершенствованных технологий сорбционной очистки сточных вод с использованием торфа — перспективное направле-

ние. В литературе отсутствуют достаточно полные данные об использовании брикетированного торфа в качестве сорбента таких токсичных металлов, как кадмий, свинец, медь. В Республике Беларусь имеются значительные запасы торфа, масштабные производства торфобрикетов, что создает реальные предпосылки для выпуска дешевых, экологически безопасных сорбентов на основе модифицированного брикетированного торфа. Настоящая работа посвящена исследованию сорбционных свойств брикетированного торфа для очистки сточных вод от ионов кадмия, свинца и меди.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и методы исследований

Применялись физико-химические, технологические, математические методы. Эксперименты производились с использованием торфобрикетов производства торфобрикетного завода «Гатча-Осовский», расположенного в Жабинковском районе Брестской области. Брикет механическим способом гранулировали, затем рассеивали через набор сит калибром 1,00 – 2,00 – 3,25 – 3,75 – 4,50 – 5,50 мм. В результате были получены образцы крупностью < 1 мм, 1,00–2,00 мм, 2,00–3,25 мм, 3,25–3,75 мм, 3,75–4,50 мм, 4,50–5,50 мм. Исследовалась сорбция ионов кадмия Cd^{+2} , свинца Pb^{+2} , меди Cu^{+2} . В стакан помещали 100 мл раствора и добавляли 10 г гранул торфа. Затем суспензию перемешивали с помощью механических мешалок (рис. 1) в течение 3, 5, 10, 20, 40, 60 минут. Растворы фильтровали через бумажный фильтр (рис. 2) и определяли остаточное содержание ионов кадмия Cd^{+2} , свинца Pb^{+2} , меди Cu^{+2} . Анализ пробы модельного раствора на содержание Cd^{+2} , Pb^{+2} , Cu^{+2} выполняли с помощью анализатора вольтамперометрического АВА-3 (рис. 3). На рис. 4 приведен пример анодных вольтамперных кривых, зарегистрированных на индикаторном электроде при анализе пробы модельного раствора на содержание Cd^{+2} , Pb^{+2} , Cu^{+2} .

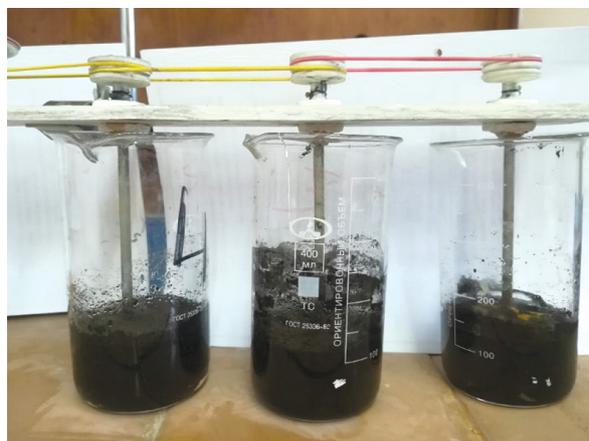


Рис. 1. Механическое перемешивание

Fig. 1. Mechanical mixing



Рис. 2. Фильтрационное отделение сорбента

Fig. 2. Sorbent filtration

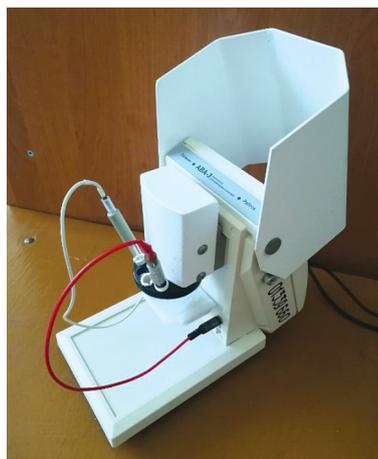


Рис. 3. Анализатор вольтамперометрический АВА-3

Fig. 3. Voltammetric analyzer ABA-3

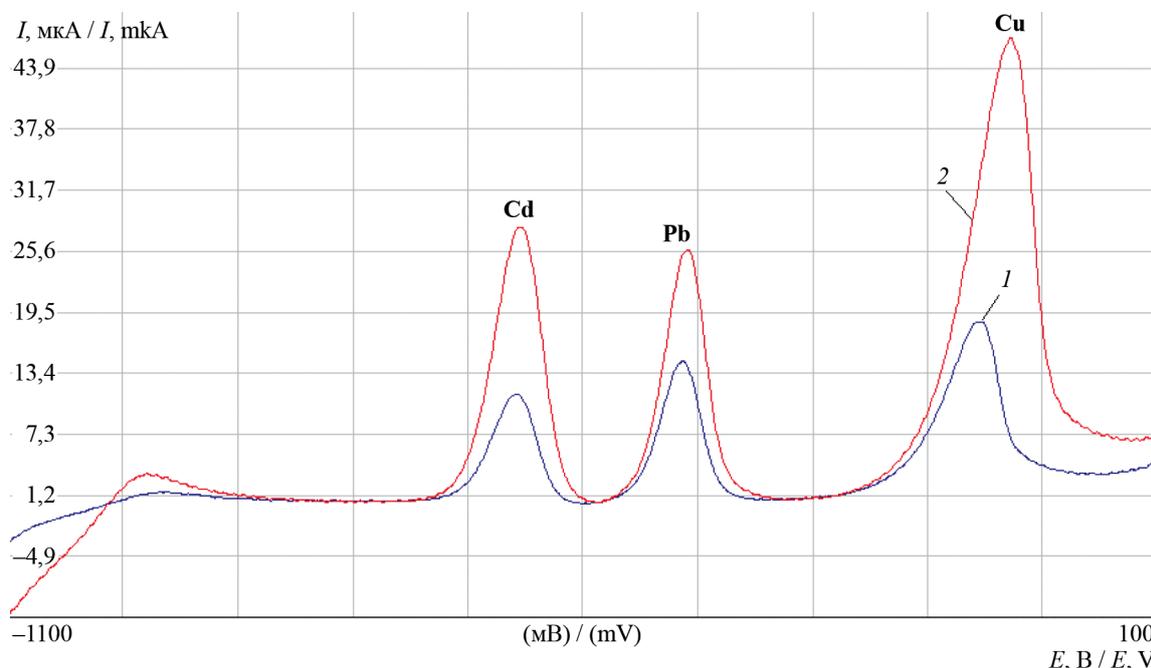


Рис. 4. Анодные вольтамперные кривые разности: 1 — пробы модельного раствора и фонового электролита (фон хлоридный); 2 — пробы модельного раствора с добавкой стандартного раствора, содержащего 2 мг/дм³ Cd²⁺, Pb²⁺, Cu²⁺ и фонового электролита

Fig. 4. Anodic current-voltage difference curves: 1 — samples of the model solution and the background electrolyte (chloride background); 2 — samples of the model solution containing standard solution that has 2 mg/dm³ Cd²⁺, Pb²⁺, Cu²⁺ and the background electrolyte

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предварительно изучалась зависимость эффекта очистки от крупности зерен брикетированного торфа. Исследовали эффективность сорбции для гранул средних размеров 1, 2, 3 и 4 мм, при продолжительности контакта 60 минут, результаты приведены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что с увеличением крупности гранул сорбента эффективность сорбции снижает-

ся, это является следствием того, что уменьшается площадь межфазовой границы между сорбентом и раствором. Дальнейшие исследования выполнялись с гранулами размером около 1 мм.

Эффект очистки воды от ионов Cd²⁺, Pb²⁺, Cu²⁺ рассчитывался по формуле:

$$\Theta = ((C_1 - C_2) / C_1) \cdot 100, \quad (1)$$

где C₁, C₂ — соответственно массовая концентрация ионов до и после опыта.

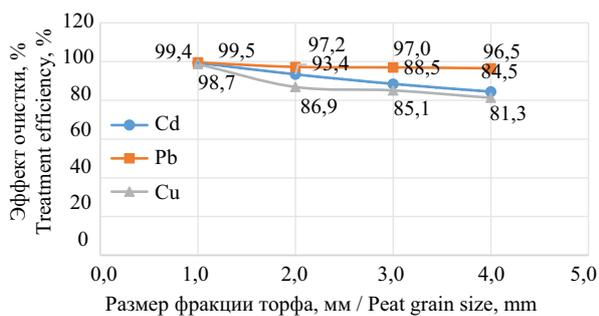


Рис. 5. Влияние размеров зерен брикетированного торфа на эффективность сорбции при продолжительности контакта 60 мин

Fig. 5. The influence of grain sizes of peat briquettes on sorption efficiency, if the contact time is 60 min

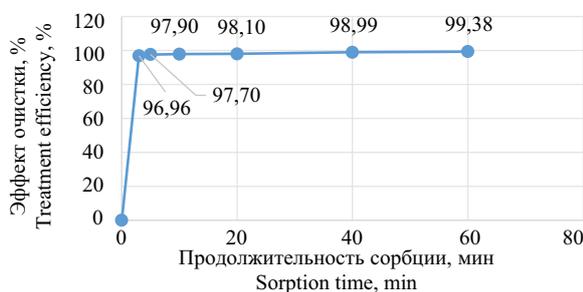


Рис. 7. Зависимость эффекта сорбции ионов Pb⁺² от продолжительности контакта

Fig. 7. The ratio of Pb⁺² ions sorption on contact time, min

Наиболее эффективно процесс сорбции ионов брикетированным торфом протекает в течение 20 мин контакта, затем он замедляется. В течение 20 мин удаляется до 97–98 % ионов Cd⁺², Pb⁺², Cu⁺² (рис. 6–8) и практически наступает сорбционное равновесие. Степень достижения равновесия F показывает, какая часть общего количества вещества сорбируется к данному моменту времени, и для брикетированного торфа она составила

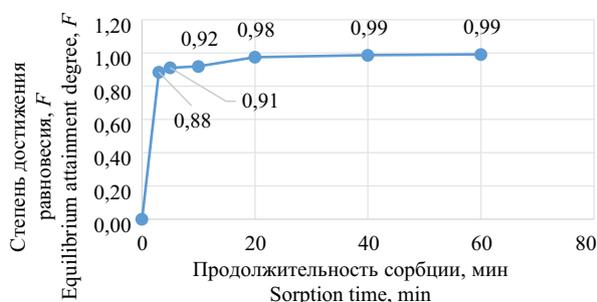


Рис. 9. Зависимость степени достижения равновесия от продолжительности контакта брикетированного торфа с раствором, содержащим ионы Cd⁺²

Fig. 9. The ratio of the equilibrium attainment degree on the time of the peat briquette contact with the solution containing cadmium ions Cd⁺²

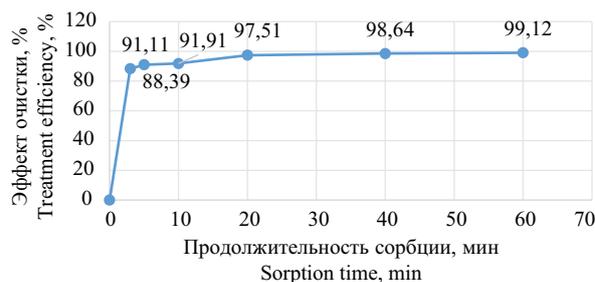


Рис. 6. Зависимость эффекта сорбции ионов Cd⁺² от продолжительности контакта, мин

Fig. 6. The ratio of Cd⁺² ions sorption on contact time, min

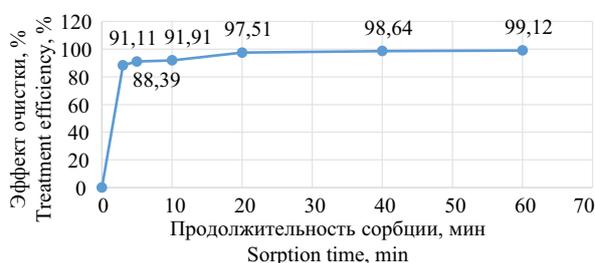


Рис. 8. Зависимость эффекта сорбции ионов Cu⁺² от продолжительности контакта

Fig. 8. The ratio of Cu⁺² ions sorption on contact time, min

для Cd⁺² около $F = 0,88$ при продолжительности контакта 3 мин и $F = 0,99$ при контакте 40 мин (рис. 9–11), соответственно для свинца (II) 0,97 и 0,99, а для меди (II) 0,84 и 0,99. Таким образом, наиболее быстро происходит сорбция свинца (II), затем Cd⁺², наконец, меди (II), но при продолжительности контакта 40 мин, для всех исследованных ионов степень достижения равновесия составила $F = 0,99$.

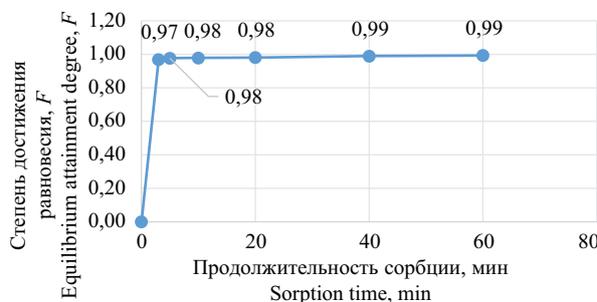


Рис. 10. Зависимость степени достижения равновесия от продолжительности контакта брикетированного торфа с раствором, содержащим ионы Pb⁺²

Fig. 10. The ratio of the equilibrium attainment degree on the time of the peat briquette contact with the solution containing lead ions Pb⁺²

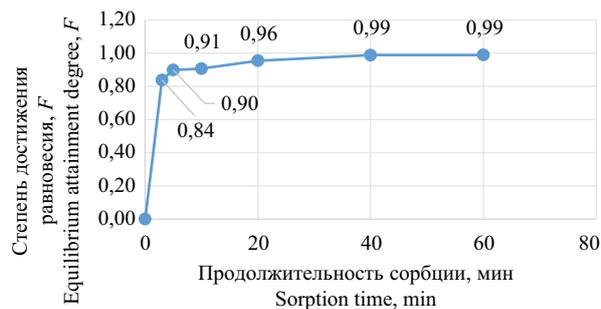


Рис. 11. Зависимость степени достижения равновесия от продолжительности контакта брикетированного торфа с раствором, содержащим ионы Cu^{+2}

Fig. 11. The ratio of the equilibrium attainment degree on the time of the peat briquette contact with the solution containing copper ions Cu^{+2}

Кратность извлечения — отношение исходной концентрации к равновесной составила для ионов Cd^{+2} — 114, Pb^{+2} — 162, Cu^{+2} — 93.

Кинетические кривые сорбции представлены на рис. 12–14. Адсорбционная емкость брикетированного торфа рассчитывалась по уравнению:

$$A = (C_1 - C_{\text{равн}}) \left(\frac{V}{m} \right), \quad (2)$$

где C_1 — исходная концентрация ионов Cd^{+2} , Pb^{+2} , Cu^{+2} в растворе, мМоль/дм³; $C_{\text{равн}}$ — равновесная концентрация ионов Cd^{+2} , Pb^{+2} , Cu^{+2} в растворе после сорбции, мМоль/дм³; V — объем раствора, дм³; m — масса навески брикетированного торфа, г.

Для выяснения механизма сорбции ионов кадмия Cd^{+2} , свинца Pb^{+2} , меди Cu^{+2} брикетированным торфом результаты экспериментов были обработаны с помощью уравнений диффузионной кинетики. Кинетическая кривая для внешне диффузионных процессов должна быть линейной в координатах: $\ln(A_e - A_t) - t$ (рис. 15), где A_e и A_t — количество сорбированного иона металла на единицу массы сорбента в состоянии равновесия и в момент времени t .

Кривые сорбции для ионов Cd^{+2} , Pb^{+2} , Cu^{+2} на начальном этапе описываются прямыми, следовательно, диффузия в пленке раствора вносит вклад в общую скорость процесса. При дальнейшем контакте графики сорбции ионов искривляются. Согласно литературным данным [34], это свидетельствует о том, что диффузия в зерне сорбента контролирует общую скорость процесса. В случае химического взаимодействия торфа с ионами ТМ (реакция ионного обмена) вклад в кинетику может вносить стадия собственно химической реакции между сорбируемым ионом и функциональными

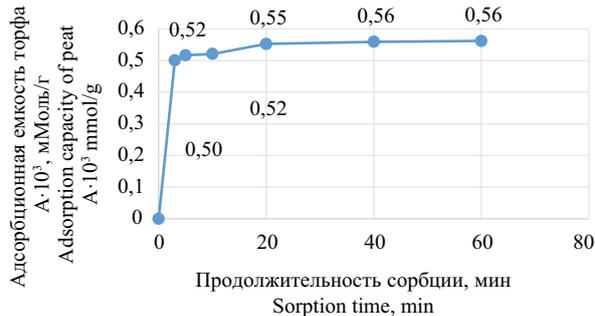


Рис. 12. Кинетическая кривая сорбции ионов Cd^{+2} брикетированным торфом

Fig. 12. The kinetic curve describing sorption of cadmium ions Cd^{+2} onto peat briquettes

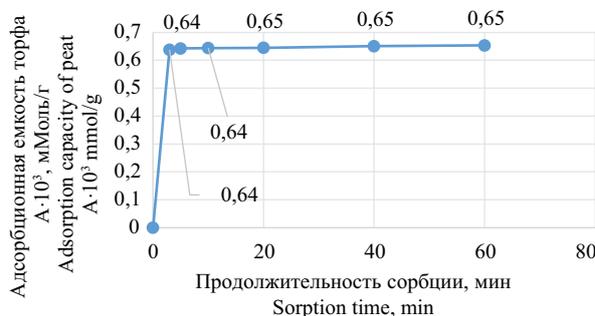


Рис. 13. Кинетическая кривая сорбции ионов Pb^{+2} брикетированным торфом

Fig. 13. The kinetic curve describing sorption of lead ions Pb^{+2} onto peat briquettes

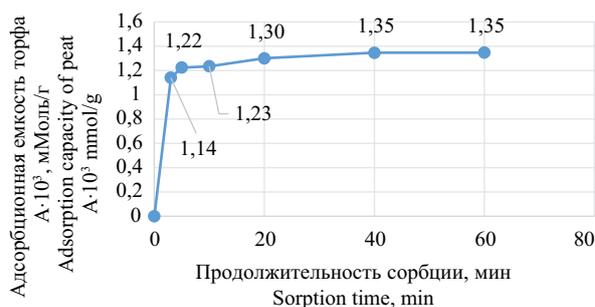


Рис. 14. Кинетическая кривая сорбции ионов Cu^{+2} брикетированным торфом

Fig. 14. The kinetic curve describing sorption of copper ions Cu^{+2} onto peat briquettes

группами поглотителя. Поэтому для выявления вклада химической стадии при описании сорбционного процесса брикетированным торфом использовали модели псевдопервого и псевдвторого порядка [34]. Линейные формы этих моделей представлены в виде уравнений (3) и (4):

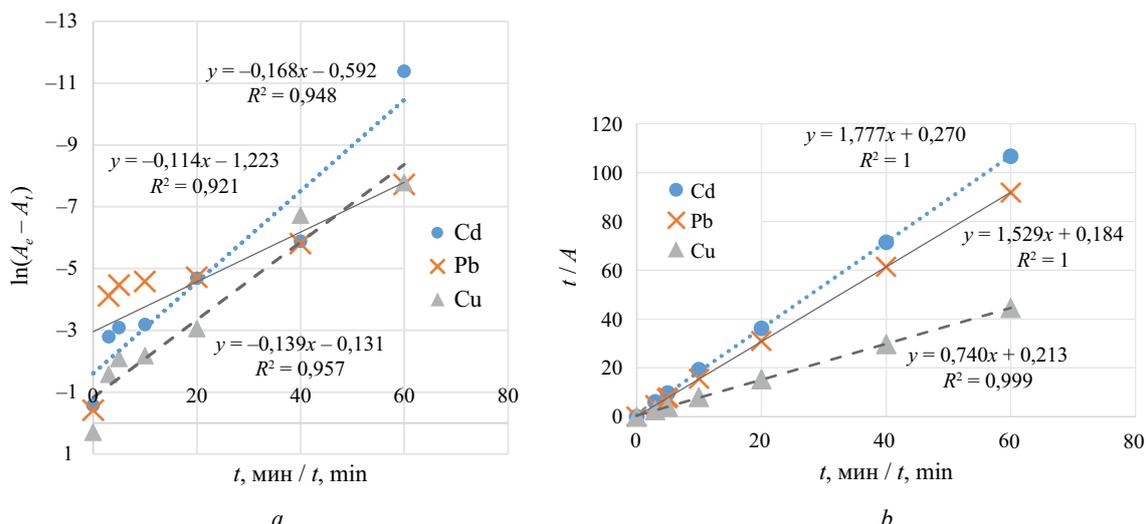


Рис. 15. Кинетические кривые сорбции ионов кадмия, свинца и меди брикетированным торфом в моделях псевдопервого (а) и псевдвторого (b) порядков: 1 — ионы Cd^{+2} ; 2 — ионы Pb^{+2} ; 3 — ионы Cu^{+2}

Fig. 15. Kinetic curves describing sorption of cadmium, lead and copper ions onto peat briquettes in models of pseudo-first (a) and pseudo-second (b) orders: 1 — Cd^{+2} ions; 2 — Pb^{+2} ions; 3 — Cu^{+2} ions

$$\ln(A_e - A_t) = \ln A_e - k_1 t; \quad (3)$$

$$\frac{t}{A_t} = \frac{1}{k_2 A_e^2} + \frac{1}{A_t} t, \quad (4)$$

где k_1 — константа скорости сорбции в модели псевдопервого порядка; k_2 — константа скорости сорбции в модели псевдвторого порядка.

Для установления модели, оптимально описывающей сорбцию [35] на брикетированном торфе (рис. 15), сравнивались коэффициенты корреляции псевдопервого и псевдвторого порядка. Установлено, что сорбция ионов Cd^{+2} , Pb^{+2} , Cu^{+2} наиболее точно описывается моделью псевдвторого порядка (рис. 15, b).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования процессов сорбции брикетированным торфом ионов кадмия Cd^{+2} , свинца Pb^{+2} и меди Cu^{+2} позволили установить следующее:

- эффективность сорбции снижается с увеличением крупности зерен брикетированного торфа;

- достаточная интенсивность процесса характеризуется тем, что за 5 мин из раствора извлекается ионов Cd^{+2} , Pb^{+2} , Cu^{+2} соответственно 91,11, 96,96 и 88,39 %, а за 20 мин степень достижения равновесия для Cd^{+2} и Pb^{+2} составила $F = 0,98$, для Cu^{+2} — $F = 0,96$, при продолжительности 40 мин для всех ионов — $F = 0,99$;

- кратность извлечения составила для ионов Cd^{+2} — 114, Pb^{+2} — 162 и Cu^{+2} — 93;

- сорбционная емкость при насыщении составила:

- по Cd^{+2} — 0,0778 мМоль/г (8,75 мг/г);
- по Pb^{+2} — 0,8205 мМоль/г (170,00 мг/г);
- по Cu^{+2} — 2,707 мМоль/г (172 мг/г);

- согласно уравнениям диффузионной и химической кинетики, процесс сорбции идет в диффузионном режиме, при этом вклад в общую скорость процесса вносит стадия химического взаимодействия ионов металлов с функциональными группами торфа.

Полученные результаты исследований свидетельствуют о возможности использования брикетированного торфа в качестве эффективного сорбента для очистки сточных вод от ионов Cd^{+2} , Pb^{+2} и Cu^{+2} .

ЛИТЕРАТУРА

1. Ramirez M., Massolo S., Frache R., Correa J.A. Metal speciation and environmental impact on sandy beaches due to El Salvador copper mine, Chile // Marine Pollution Bulletin. 2005. Vol. 50. Issue 1. Pp. 62–72. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2004.08.010
2. Ellwood M.J. Zinc and cadmium speciation in subantarctic waters east of New Zealand // Marine Chemistry. 2004. Vol. 87. Issue 1–2. Pp. 37–58. DOI: 10.1016/j.marchem.2004.01.005
3. García-Hernández J., García-Rico L., Jaramarini M.E., Barraza-Guardado R., Weaver A.H. Concentrations of heavy metals in sediment and organisms during a harmful algal bloom (HAB) at Kun Kaak Bay, Sonora, Mexico // Marine Pollution Bulletin. 2005.

Vol. 50. Issue 7. Pp. 733–739. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2005.02.027

4. *Buck N.J., Gobler C.J., Sañudo-Wilhelmy S.A.* Dissolved trace element concentrations in the east river–long island sound system: relative importance of autochthonous versus allochthonous sources // *Environmental Science & Technology*. 2005. Vol. 39. Issue 10. Pp. 3528–3537. DOI: 10.1021/es048860t

5. *Видинеева Е.М., Толкачева Г.А., Верещагина Н.Г.* О тенденциях загрязнения тяжелыми металлами речных вод Чирчик-Ахангаранского бассейна // *Труды Научно-исследовательского гидрометеорологического ин-та Узгидромета*. 2006. № 1. С. 102–109, 168, 175, 182.

6. *Adami G., Capriglia L., Barbieri P., Cozzi F., Coco F.L., Acquavita A., Reisenhofer E.* Sediment metal contamination in a Creek flowing from a pristine to an industrial area of Trieste Province (Italy) // *Annali di Chimica*. 2006. Vol. 96. Issue 9–10. Pp. 601–612. DOI: 10.1002/adic.200690061

7. *Croisetière L., Hare L., Tessier A., Duchesne S.* Modeling cadmium exchange by an aquatic moss (*Fontinalis dalecarlica*) // *Environmental Science & Technology*. 2005. Vol. 39. Issue 9. Pp. 3056–3060. DOI: 10.1021/es049272i

8. *Kola H., Wilkinson K.J.* Cadmium uptake by a green alga can be predicted by equilibrium modelling // *Environmental Science & Technology*. 2005. Vol. 39. Issue 9. Pp. 3040–3047. DOI: 10.1021/es048655d

9. *Марков В.Ф., Формазюк Н.И., Маскаева Л.Н., Макурин Ю.Н., Васин А.Н.* Использование композиционного сорбента для извлечения из водных растворов меди, никеля, цинка, кадмия // *Экологические проблемы промышленных регионов* : мат. 7-й Всеросс. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2006. С. 224.

10. *Silva D.L., Brunner G.* Desorption of heavy metals from ion exchange resin with water and carbon dioxide // *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2006. Vol. 23. Issue 2. Pp. 213–218. DOI: 10.1590/s0104-66322006000200008

11. *Tomaszewska M., Jeschke A., Borowiak-Resterna A., Cierpiszewski R., Prochaska K.* Studies on the rate of extraction of Cd(II) from chloride systems with hydrophobic nicotinamide derivatives // *Przemysl Chemiczny*. 2006. Vol. 85. Issue 8–9. Pp. 668–670.

12. Пат. № 7011756 США, МПК С 02 F 1/62, С 02 F 3/28. In situ immobilization of metals within density variant bodies of water / Harrington Joseph G.; заявл. № 10/398703 03.10.2001; опубл. 14.03.2006; НПК 210/603.

13. *Nystroem G.M., Ottosen L.M., Villumsen A.* Electrolytic removal of Cu, Zn, Pb, and Cd from harbor sediment: Influence of changing experimental conditions // *Environmental Science & Technology*. 2005. Vol. 39. Issue 8. Pp. 2906–2911. DOI: 10.1021/es048930w

14. *Gavris G., Burtica G., Iovi A.* Study of the cleaning process with cadmium ions from residual waters // *Buletinul Ştiinţific al Universităţii “Politehnica” din Timisoara, ROMÂNIA Seria CHIMIE ŞI INGINERIA MEDIULUI*. 2005. Vol. 50. Issue 1–2. Pp. 163–165.

15. *Reddad Z., Gerente C., Andres Y., Le Cloirec P.* Valorisation d’un sous-produit de l’industrie sucrière : mise en œuvre dans un procédé de traitement d’eaux usées industrielles // *Déchets, sciences et techniques*. 2005. Issue 39. DOI: 10.4267/dechets-sciences-techniques. 1966

16. *Chirenje T., Ma L.Q., Lu L.* Retention of Cd, Cu, Pb and Zn by wood ash, lime and fume dust // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2006. Vol. 171. Issue 1–4. Pp. 301–314. DOI: 10.1007/s11270-005-9051-4

17. *Лиштван И.И., Дударчик В.М., Коврик С.И., Смычник Т.П.* Очистка сточных вод от металлов-экоотоксикантов торфяными препаратами // *Химия и технология воды*. 2007. Т. 29. № 1. С. 67–74.

18. *Богуш А.А., Мороз Т.Н., Галкова О.Г., Маскенская О.М.* Применение природных материалов для очистки техногенных вод // *Экология промышленного производства*. 2007. № 2. С. 63–69.

19. *Богуш А.А., Трофимов А.Н.* Применение торфогуминовых веществ для снижения техногенного влияния отходов на окружающую среду // *Химическая промышленность*. 2005. Т. 82. № 3. С. 153–158.

20. *Арканова И.А., Китаев Д.М., Луценко Ю.Д.* Новые фильтрующие материалы для очистки природных вод // *Достижения науки — агропромышленному производству* : мат. 46-й Междунар. науч.-техн. конф. Челябинск, 2007. Ч. 3. С. 164–169.

21. *Ulmanu M., Anger I., Fernández Y., Castrilón L., Marañón E.* Batch chromium(VI), cadmium(II) and lead(II) removal from aqueous solutions by horticultural peat // *Water, Air, and Soil Pollution*. 2008. Vol. 194. Issue 1–4. Pp. 209–216. DOI: 10.1007/s11270-008-9709-9

22. Пат. RU № 2174439 Россия, МПК В 01J 20/28, 20/24, 20/30. Сорбционно-фильтровальная загрузка для очистки воды и способ ее производства / Косов В.И., Баженова Э.В. Патентообл. Твер. гос. техн. ун-т.; заявл. № 2000116957/12 26.06.2000; опубл. 10.10.2001.

23. *Косов В.И., Баженова Э.В.* Исследования сорбентов на природной основе для очистки промстоков от цинка // *Проблемы инженерного обеспечения и экологии городов* : Международ. научно-практическая конф. 1999. С. 130–133.

24. *Косов В.И., Баженова Э.В., Чаусов Ф.Ф.* Очистка промстоков от ионов цинка с применением гранулированного торфа // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2001. № 7. С. 38–40.

25. *Янг-Тсе Ханг, Ло Говард Г.* Очистка сточных вод производства по переработке картофеля с использованием адсорбции торфом и глиной и биопрепаратов // *Исследование проблем водоснаб-*

жения, водоотведения и подготовки специалистов: межвузовский сб. научных трудов. 1999. С. 129–132.

26. Пат. № 6429171 США, МПК В 01 J 20/22. Method of processing peat for use in contaminated water treatment / Environmental Filtration, Inc., Clemenson Lyle J.; Заявл. № 09/514197 25.02.2000; опубл. 06.08.2002; НПК 502/404.

27. Sun Qing-ye, Yang Lin-zhang. Chengshi huanjing yu chengshi shengtai // Urban Environ. and Urban Ecol. 2002. Vol. 15. Issue 3. Pp. 5–8.

28. Баженова Э.В. Экспериментальное обоснование способов очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов торфяными модификациями : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2002. 22 с.

29. Томсон А., Самсонова А.С., Алещенко-ва З.М., Николаенков А.И., Мелещенко Б.А., Соколова Т.В. и др. Перспективы использования торфа для решения комплексной проблемы охраны окружающей среды // Физика и химия торфа в решении проблем экологии : тез. докл. Междунар. симп. Минск, 2002. С. 158–160.

30. Вялкова Е.И., Большаков А.А. Очистка сточных вод с использованием природных материалов и отходов производства // Актуальные проблемы

современного строительства : сб. науч. тр. 32 Всероссий. науч.-техн. конф. Пенза, 2003. С. 194–198.

31. Ma W., Tobin J.M. Development of multi-metal binding model and application to binary metal biosorption onto peat biomass // Water Research. 2003. Vol. 37. Issue 16. Pp. 3967–3977. DOI: 10.1016/s0043-1354(03)00290-2

32. Ho Y.S., McKay G. Sorption of Copper(II) from aqueous solution by peat // Water, Air & Soil Pollution. 2004. Vol. 158. Issue 1. Pp. 77–97. DOI: 10.1023/b:wate.0000044830.63767.a3

33. Sun Q.Y., Lu P., Yang L.Z. The adsorption of lead and copper from aqueous solution on modified peat-resin particles // Environmental Geochemistry and Health. 2004. Vol. 26. Issue 2. Pp. 311–317. DOI: 10.1023/b:egah.0000039595.12014.6b

34. Дремичева Е.С. Изучение кинетики сорбции на торфе ионов железа(III) и меди(II) из сточных вод // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. 2017. Т. 58. № 4. С. 204–207.

35. Житенев Б.Н., Сенчук Д.Д. Исследование сорбционных свойств брикетированного торфа для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов // Вестник Брестского государственного технического университета. 2019. № 2 (115). С. 61–65.

Поступила в редакцию 17 августа 2020 г.

Принята в доработанном виде 13 ноября 2020 г.

Одобрена для публикации 20 ноября 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Борис Николаевич Житенев** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; Республика Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267; РИНЦ ID: 1058541; gitenev@tut.by;

Анатолий Дмитриевич Гуринович — доктор технических наук, профессор; **Белостокский технический университет**; Польша, 15-351, г. Белосток, ул. Вейска, д. 45А; РИНЦ ID: 910066; a.giurinowicz@pd.edu.pl;

Дарья Дмитриевна Сенчук — магистр, ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов; **Брестский государственный технический университет (БрГТУ)**; Республика Беларусь, 224017, г. Брест, ул. Московская, д. 267; senchuk.d.d@mail.ru.

REFERENCES

1. Ramirez M., Massolo S., Frache R., Correa J.A. Metal speciation and environmental impact on sandy beaches due to El Salvador copper mine, Chile. *Marine Pollution Bulletin*. 2005; 50(1):62-72. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2004.08.010

2. Ellwood M.J. Zinc and cadmium speciation in subantarctic waters east of New Zealand. *Marine Chemistry*. 2004; 87:1-2:37-58. DOI: 10.1016/j.marchem.2004.01.005

3. García-Hernández J., García-Rico L., Jaramarini M.E., Barraza-Guardado R., Weaver A.H. Concentrations of heavy metals in sediment and organisms during a harmful algal bloom (HAB) at Kun Kaak Bay, Sonora, Mexico. *Marine Pollution Bulletin*. 2005; 50(7):733-739. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2005.02.027

4. Buck N.J., Gobler C.J., Sañudo-Wilhelmy S.A. Dissolved trace element concentrations in the east river-long island sound system: relative importance of autochthonous versus allochthonous sources. *Environmental Science & Technology*. 2005; 39(10):3528-3537. DOI: 10.1021/es048860t

5. Vidineeva E.M., Tolkacheva G.A., Vereshchagina N.G. Trends in heavy metal pollution of river waters of the Chirchik-Akhangaran basin. *Proceedings of the Scientific Research Hydrometeorological Institute of Uzhydromet*. 2006; 1:102-109, 168, 175, 182. (rus.).

6. Adami G., Capriglia L., Barbieri P., Cozzi F., Coco F.L., Acquavita A., Reisenhofer E. Sediment metal contamination in a Creek flowing from a pristine to an industrial area of Trieste Province (Italy). *An-*

nali di Chimica. 2006; 96:9-10:601-612. DOI: 10.1002/adac.200690061

7. Croisetière L., Hare L., Tessier A., Duchesne S. Modeling cadmium exchange by an aquatic moss (*Fontinalis dalecarlica*). *Environmental Science & Technology*. 2005; 39(9):3056-3060. DOI: 10.1021/es049272i

8. Kola H., Wilkinson K.J. Cadmium uptake by a green alga can be predicted by equilibrium modeling. *Environmental Science & Technology*. 2005; 39(9):3040-3047. DOI: 10.1021/es048655d

9. Markov V.F., Formazyuk N.I., Maskaeva L.N., Makurin Yu.N., Vasin A.N. The use of a composite sorbent for the extraction of copper, nickel, zinc, cadmium from aqueous solutions. *Ecological problems of industrial regions: materials of the 7th All-Russian scientific-practical conference*. Yekaterinburg, 2006; 224. (rus.).

10. Silva D.L., Brunner G. Desorption of heavy metals from ion exchange resin with water and carbon dioxide. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2006; 23(2):213-218. DOI: 10.1590/s0104-66322006000200008

11. Tomaszewska M., Jeschke A., Borowiak-Resterna A., Cierpiszewski R., Prochaska K. Studies on the rate of extraction of Cd(II) from chloride systems with hydrophobic nicotinamide derivatives. *Przemysł Chemiczny*. 2006; 85(8-9):668-670.

12. Pat. No. 7011756 USA, IPC C 02 F 1/62, C 02 F 3/28. In situ im-mobilization of metals within density variant bodies of water / Harrington Joseph G.; declared No. 10/398703 03.10.2001; publ. 03/14/2006; NPK 210/603.

13. Nystroem G.M., Ottosen L.M., Villumsen A. Electrodealytic removal of Cu, Zn, Pb, and Cd from harbor sediment: influence of changing experimental conditions. *Environmental Science & Technology*. 2005; 39(8):2906-2911. DOI: 10.1021/es048930w

14. Gavris G., Burtica G., Iovi A. Study of the cleaning process with cadmium ions from residual waters. *Scientific Bulletin of the Politechnica University of Timisoara, Romania. Ser. Chim. si ing. med.* 2005; 50(1-2):163-165.

15. Reddad Z., Gerente C., Andres Y., Le Cloirec P. Valorisation d'un sous-produit de l'industrie sucrière : mise en œuvre dans un procédé de traitement d'eaux usées industrielles. *Déchets, sciences et techniques*. 2005; 39. DOI: 10.4267/dechets-sciences-techniques.1966 (fr.).

16. Chirenje T., Ma L.Q., Lu L. Retention of Cd, Cu, Pb and Zn by wood ash, lime and fume dust. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2006; 171(1-4):301-314. DOI: 10.1007/s11270-005-9051-4

17. Lishtvan I.I., Dudarchik V.M., Kovrik S.I., Smychnik T.P. Purification of waste water from metals-ecotoxicants with peat preparations. *Chemistry and Technology of Water*. 2007; 29(1):67-74. (rus.).

18. Bogush A.A., Moroz T.N., Galkova O.G., Maskenskaya O.M. The use of natural materials for

the treatment of technogenic waters. *Ecology of Industrial Production*. 2007; 2:63-69. (rus.).

19. Bogush A.A., Trofimov A.N. The use of peat-humic substances to reduce the technogenic impact of waste on the environment. *Chemical Industry*. 2005; 82(3):153-158. (rus.).

20. Arkanova I.A., Kitaev D.M., Lutsenko Yu.D. New filtering materials for natural water purification. *Scientific achievements for agro-industrial production: materials of the 46th International Scientific and Technical Conference*. Chelyabinsk, 2007; 3:164-169. (rus.).

21. Ulmanu M., Anger I., Fernández Y., Castril-lón L., Marañón E. Batch chromium(VI), cadmium(II) and lead(II) re-removal from aqueous solutions by horticultural peat. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2008; 194(1-4):209-216. DOI: 10.1007/s11270-008-9709-9

22. Pat. RU No. 2174439 Russia, IPC B 01J 20/28, 20/24, 20/30. Sorption-filtering loading for water purification and method of its production / Kosov V.I., Bazhenova E.V. Patented Tver. state tech. un-t; declared No. 2000116957/12 06/26/2000; publ. 10.10.2001.

23. Kosov V.I., Bazhenova E.V. Research of sorbents on a natural basis for the purification of industrial waste from zinc. *Problems of engineering support and ecology of cities: International scientific and practical conference*. 1999; 130-133. (rus.).

24. Kosov V.I., Bazhenova E.V., Chausov F.F. Purification of industrial wastewater from zinc ions using granular peat. *Chemical and Oil and Gas Engineering*. 2001; 7:38-40. (rus.).

25. Yang-Tse Hang, Lo Howard G. Wastewater treatment of potato processing production using adsorption by peat and clay and biological products. *Research of problems of water supply, wastewater disposal and training of specialists: interuniversity collection of scientific papers*. 1999; 129-132. (rus.).

26. Pat. No. 6429171 USA, IPC B 01 J 20/22. Method of processing peat for use in contaminated water treatment / Clemenson Lyle J.; appl. No. 09/514197 02/25/2000; publ. 06.08.2002; NPK 502/404.

27. Sun Qing-ye, Yang Lin-zhang. Chengshi huanjing yu chengshi shengtai. *Urban Environ. and Urban Ecol*. 2002; 15(3):5-8. (chn.).

28. Bazhenova E.V. *Experimental substantiation of methods of purification of waste water from ions of heavy metals by peat modifications: author. dis. for a job. uch. step. cand. tech. sciences*. Tver, 2002; 22. (rus.).

29. Thomson A., Samsonova A.S., Aleshenkova Z.M., Nikolaenkov A.I., Meleshchenko B.A., Sokolova T.V. et al. Prospects for the use of peat for solving the complex problem of environmental protection. *Physics and chemistry of peat in solving environmental problems: abstracts of the International Symposium*. Minsk, 2002; 158-160. (rus.).

30. Vyalkova E.I., Bolshakov A.A. Wastewater treatment using natural materials and industrial waste. *Actual problems of modern construction: collection of scientific papers of the 32nd All-Russian scientific and technical conference*. Penza, 2003; 194-198. (rus.).
31. Ma W., Tobin J.M. Development of multi-metal binding model and application to binary metal biosorption onto peat biomass. *Water Research*. 2003; 37(16):3967-3977. DOI: 10.1016/s0043-1354(03)00290-2
32. Ho Y.S., McKay G. Sorption of Copper(II) from aqueous solution by peat. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2004; 158(1):77-97. DOI: 10.1023/b:wate.0000044830.63767.a3
33. Sun Q.Y., Lu P., Yang L.Z. The adsorption of lead and copper from aqueous solution on modified peat-resin particles. *Environmental Geochemistry and Health*. 2004; 26(2):311-317. DOI: 10.1023/b:egah.000039595.12014.6b
34. Dremicheva E.S. Study of the kinetics of sorption of iron (III) and copper (II) ions from wastewater on peat. *Moscow University Bulletin. Series 2. Chemistry*. 2017; 58(4):204-207. (rus.).
35. Zhitenev B.N., Senchuk D.D. Study of sorption properties of briquetted peat for wastewater treatment from heavy metal ions. *Bulletin of the Brest State Technical University*. 2019; 2(115):61-65. (rus.).

Received August 17, 2020.

Adopted in revised form on November 13, 2020.

Approved for publication on November 20, 2020.

BIONOTES: **Barys N. Zhytsianiou** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Water Supply, Sanitation and Water Resources Protection; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moscow st., Brest, 224017, Republic of Belarus; ID RISC: 1058541; gitenev@tut.by;

Anatoli D. Hurynovich — Doctor of Technical Sciences, professor; **Bialystok University of Technology**; 45A Wiejska st., Bialystok, 15-351, Poland; ID RISC: 910066; a.giuriniowicz@pd.edu.pl;

Darya D. Sianchuk — master, assistant of the Department of Water Supply, Sanitation and Water Resources Protection; **Brest State Technical University (BrSTU)**; 267 Moscow st., Brest, 224017, Republic of Belarus; senchuk.d.d@mail.ru.

Соединение и разделение потоков в тройнике: метод Павловского

М.Р. Петриченко, О.А. Соловьева

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);
г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрено соединение и разделение потоков в тройнике, используя метод Павловского.

Материалы и методы. Соединение и разделение потоков в прямом тройнике редуцировано на предельную задачу теории функций для характеристической функции течения. Выясняется влияние геометрического параметра тройника (модуля), потерь напора и внешнего источника мощности на коэффициент изменения расхода тройника.

Результаты. Получена связь геометрических параметров тройника с его пропускной способностью в условиях энергоизолированного течения и при наличии подвода механической мощности извне.

Выводы. Для практических задач достаточно отображения пятиугольника, стилизующего простой прямой тройник, на полосу с уступом, с сохранением соответствия точек многоугольников. При этом сделаны следующие выводы: диссипация не уменьшает коэффициента изменения расхода при соединении потоков и не уменьшает коэффициента изменения расхода при разделении потоков; минимальное значение коэффициента изменения расхода $q = Q_0/Q_1$ при соединении потоков достигается при отсутствии диссипации и не превышает $q = -\kappa/2 + \sqrt{1+\kappa^2/4}$; максимальное значение коэффициента изменения расхода при разделении потоков достигается при отсутствии диссипации и не меньше, чем $q = \kappa/2 + \sqrt{1+\kappa^2/4}$; диссипация в тройнике обусловлена отрывами потока от вершины угла B при соединении потоков и отрывом от вершины угла C при соединении потоков. Гидравлические потери не уменьшают коэффициент изменения расхода $q = q_+$ при соединении потоков и не увеличивают коэффициента изменения расхода $q = q_-$ при разделении потоков; введение в тройник внешней механической мощности (насоса) при соединении потоков всегда приводит к уменьшению коэффициента изменения расхода q_+ ; в случае разделения расходов введение внешней механической мощности увеличивает коэффициент изменения расхода в промежутке $1 < q_- < 2$ и не увеличивает, если $q_- > 2$.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тройник, метод Павловского, расход, поток, диссипация, мощность, характеристическая функция

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Петриченко М.Р., Соловьева О.А. Соединение и разделение потоков в тройнике: метод Павловского // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 11. С. 1546–1555. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1546-1555

Merging and splitting flows in a tee: the Pavlovsky method

Mihail R. Petrichenko, Ol'ga A. Solov'yova

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

ABSTRACT

Introduction. The Pavlovsky method is employed to consider the flows that merge and split inside a tee.

Materials and methods. The problem of flows, merging and splitting inside a simple straight tee, is reduced to the problem of limits in a theory of functions applied to the characteristic function of a flow. The influence of the geometric parameter of a tee (a module), head losses and an external power source, produced on the flow rate coefficient in a tee, is identified in the work.

Results. The co-authors identified a relation between the geometric parameters of a tee and its capacity in case of an isoenergetic flow and an external mechanical power supply.

Conclusions. As for practical tasks, it is sufficient to reproduce a pentagon, stylizing a simple straight tee, on a strip having a ledge, while preserving the correspondence of points of polygons. The following conclusions are made: dissipation does not reduce the flow rate coefficient when flows merge, neither does it reduce the flow rate coefficient when flows split; minimum values of flow rate coefficient $q = Q_0/Q_1$ in case of merging flows are attained in the absence of dissipation, and they do not exceed $q = -\kappa/2 + \sqrt{1+\kappa^2/4}$; the maximum value of the flow rate coefficient in case of splitting flows is attained in the absence of dissipation and it is not less than $q = \kappa/2 + \sqrt{1+\kappa^2/4}$; dissipation in a tee is explained by the flow separation from the vertex of angle B when flows merge and by the flow separation from the vertex of angle C when flows merge. Hydraulic losses do not reduce flow rate coefficient $q = q_+$ when flows merge and do not increase flow rate coefficient $q = q_-$ when flows split. flow rate coefficient q_+ goes down if a source of external mechanical power (a pump) is connected to a tee when flows merge; if flows split, the flow rate coefficient goes up and varies within the $1 < q_- < 2$ interval, and it doesn't go up if $q_- > 2$.

KEYWORDS: tee, Pavlovsky method, flow rate, flow, dissipation, power, characteristic function

FOR CITATION: Petrichenko M.R., Solov'yova O.A. Merging and splitting flows in a tee: the Pavlovsky method. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(11):1546-1555. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1546-1555 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Задача о соединении и разделении потоков в тройниках — частный случай гидравлики переменной массы (переменного расхода), развивалась, главным образом, по пути решения алгебраических уравнений, получаемых из интегралов Бернулли и импульса для равномерных движений [1–7]. Эти результаты, при всей своей уязвимости и нелепости (отрицательные коэффициенты потерь), попали в учебники и в справочники [8–10]. Параллельно развивались методы, связанные с теорией аналитических функций, мотивированные задачами расчета пропускной способности вентиляционных и водопроводящих систем и гидротехнических объектов [11, 12]. В данной схеме используется модель движения *эффективно невязкой жидкости* как предельной формы движения вязкой жидкости при достаточно больших числах Рейнольдса [12]. Модель удобна тем, что позволяет применить элементарные методы теории аналитических функций с минимальным использованием эмпирических гипотез.

Для решения задач этого круга используется метод особенностей Чаплыгина [12]. Пусть в области $J(z)$ значений переменной z (физическая плоскость) известно расположение особых точек потока — критических, особых (полюсов разного порядка). Тогда комплексная сопряженная скорость (плоскость годографа) находится в виде:

$$\bar{u}(z) = r(z) + g(z),$$

где $r(z)$ — целая, $g(z)$ — мероморфная функция переменной $z \in D(z)$. При правильном подборе особых точек $\bar{u} = \bar{u}(z)$ задает конформное преобразование области годографа на $J(z)$. Характер особенностей обнаруживается при вычислении первообразной $\chi(z)$:

$$\chi(z) := \int_0^z \bar{u} dt + \text{const},$$

где путь интегрирования, дуга или отрезок прямой $(0, z)$ не проходят через особые точки скорости.

Задачи об отображении $J(u) \rightarrow J(z)$ в общем случае сводятся к отображению n -угольника с прямыми и круговыми сторонами на область простого вида. Отображающая функция получается, как решение уравнения Шварца с $n-1$ особыми точками [13]. Решение уравнения Шварца — суть мероморфная функция, частное двух гипергеометрических функций (решений уравнения Фукса), в случае вырождения приводится к частному полиномов невысокой степени и допускает разложение в конечный ряд элементарных дробей (метод Чаплыгина). Этот метод впервые (1942 г.) применен

к решению задач теории фильтрации П.Я. Полу-бариновой-Кочиной и в настоящее время широко используется для определения формы депрессионной кривой, определения высоты промежутка высачивания и т.д. [14–21]. Для прямолинейных многоугольников решение уравнения Шварца сводится к формуле Шварца – Кристоффеля и использовалось для решения фильтрационных задач Н.Н. Павловским в диссертации 1922 г. [22]. Суть метода Н.Н. Павловского проста: строятся два конформных отображения: $J(\chi) \rightarrow \text{Im}(t) > 0 = D(\chi)$, $J(z) \rightarrow \text{Im}(t) > 0 = D(z)$ на верхнюю полуплоскость параметра t , $\text{Im}\chi(t) > 0$. В областях однолиственности обоих отображений они задают биекцию $J(\chi) \rightarrow J(z)$, что и решает задачу. Тогда можно рассчитать, например, поле скорости, $\bar{u}(z) = \frac{d\chi}{dz} = \frac{d\chi/dt}{dz/dt}$, расходы и потери напора на сторонах многоугольника. Методы теории функций использованы Н.Н. Павловским для решения задачи об обтекании единичных шпунтов и флютбетов, обтекании решетки шпунтов и флютбетов. Прикладная версия метода Павловского известна как метод коэффициентов сопротивления Нумерова – Чугаева.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В принятой модели движения узел соединения (разделения) потоков создается тремя источниками, расположенными в точках A, E, D (рис. 1). Обозначим расходы в этих точках через Q_0, Q_e, Q_1 соответственно, причем условие неразрывности движения имеет вид: $Q_0 + Q_e = Q_1$, с понятным чередованием знаков.

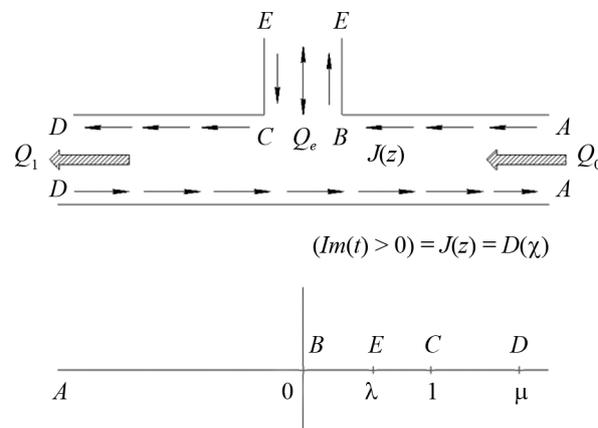


Рис. 1. Схема тройника, область $J(z)$; область $D(z)$ — полуплоскость $\text{Im}(t) > 0$

Fig. 1. Tee circuit, area $J(z)$; area $D(z)$ — half-plane $\text{Im}(t) > 0$

Решения получены конформным отображением множества значений $J(z)$ комплексной координаты $z = x + yi$ и множества $J(\chi)$ значений характеристической функции $\chi = \varphi + i\psi$, на верхнюю полуплоскость $Im(t) > 0$ параметра t . Однолистные отображения $\chi = \chi(t)$, $z = z(t)$ задают в параметрическом виде однолистное отображение $\chi = \chi(z)$ множества значений переменной z (области течения) на множество значений характеристической функции χ . Как только отображения найдены, вычисляется скорость

$$\bar{u} = u_x - iu_y = \frac{\chi'(t)}{z'(t)}, \text{ где } ' = d/dt. \text{ расходы в сечениях}$$

и коэффициент изменения расхода $q = Q_0/Q_1$, $Q_{0,1}$ — обильности источников в точках A, E соответственно. Если потоки в тройнике соединяются, $q < 1$, иначе, при разделении потоков в тройнике, $q > 1$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Прямой простой тройник, соединение и разделение потоков

Множество значений переменной $z, (z)$ стилизуется пятиугольником $ABCDE$ (см. рис. 1). Величины углов в долях π обозначаются буквами одноименных вершин в скобках; в данном случае $(A) + (B) + (C) + (D) + (E) = 3$, $(A) = (D) = (E) = 0$, $(B) = (C) = 3/2$. Конформное преобразование пятиугольника $ABCDE$ на верхнюю полуплоскость $Im(t) > 0$ имеет вид (берется ветвь отображения, соответствующая арифметическому значению корня):

$$z(t) = \frac{h}{\pi} \int_0^t \frac{\sqrt{\tau(\tau-1)}}{(\tau-\lambda)(\tau-\mu)} d\tau, \quad (1)$$

причем $t(A) = \infty$; $t(B) = 0$; $t(C) = 1$; $t(D) = \mu$; $t(E) = \lambda$, λ, μ — вещественные параметры; $h = |AA'| = |DD'|$. Вычисляя значение $z(\mu)$ как главное значение интеграла (1), получим:

$$ih = \frac{h}{\pi} i\pi \frac{\sqrt{\mu(\mu-1)}}{\mu-\lambda},$$

$$\mu - \lambda = \sqrt{\mu(\mu-1)},$$

$$\lambda = \sqrt{\mu}(\sqrt{\mu} - \sqrt{\mu-1}),$$

$$1 - \lambda = \sqrt{\mu-1}(\sqrt{\mu} - \sqrt{\mu-1}).$$

Множество значений χ изображается четырехугольником $ABCD$ (рис. 2 a, b) $(ABDE) = 2$, с таким же соответствием вершин с точками на вещественной оси полуплоскости $Im(t) > 0$, как и при отображении тройника. Разрыв расхода изображается вертикальным отрезком BC . На отрезке BC изменение вещественной части χ равно 0, поэтому потеря напора в тройнике нет. Тогда отображение области значений χ на верхнюю полуплоскость $Im(t) > 0$ имеет вид:

$$\chi(t) = \frac{Q_0}{\pi} \int_0^t \frac{\sqrt{\tau}}{\tau-1} \frac{d\tau}{\tau-\mu}, \quad (2)$$

в случае присоединения расхода и

$$\chi(t) = \frac{Q_0}{\pi} \int_0^t \frac{\sqrt{\tau-1}}{\tau} \frac{d\tau}{\tau-\mu}, \quad (3)$$

в случае отделения расхода.

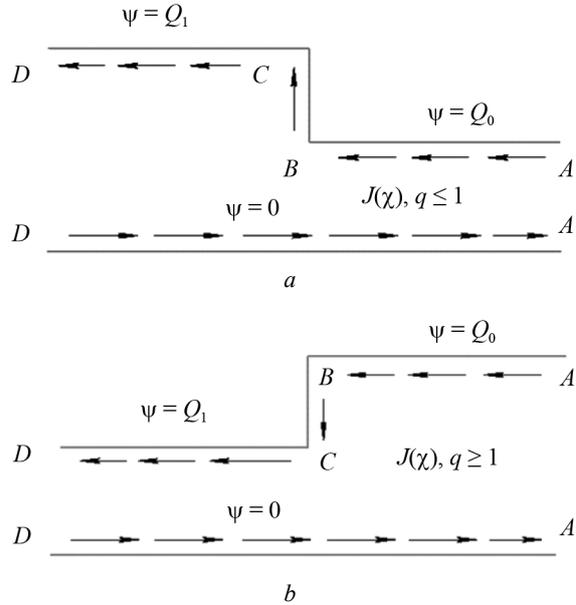


Рис. 2. Область $J(\chi)$ значений характеристической функции $\chi(z)$ — полоса. Идеальный тройник — нет потерь: a — присоединение расхода, $q = q_+ \in [0, 1]$; b — отделение расхода, $q = q_- \in [1, \infty)$

Fig. 2. The range of $J(\chi)$ values of characteristic function $\chi(z)$ is a band. A perfect tee has no losses: a — a merging flow rate, $q = q_+ \in [0, 1]$; b — a splitting flow rate, $q = q_- \in [1, \infty)$

Пусть α — величина (в долях π) угла, составляемого отрезком BC с вертикалью (рис. 3) (если $\alpha > 0$, то изменение расхода сопровождается диссипацией; если $\alpha < 0$, то изменение расхода сопровождается вводом механической мощности извне (отрицательной диссипацией)). В этом случае, например, формула (3) принимает вид:

$$\chi(t) = \frac{Q_0}{\pi} \int_0^t \left(\frac{\tau}{\tau-1} \right)^{1/2-\alpha} \frac{d\tau}{\tau-\mu}, \quad (4)$$

причем, если $\alpha > 0$, то имеет место положительная диссипация, если $\alpha < 0$, то существует дополнительный источник механической мощности в точке E .

В силу (4):

$$Q_1 = Q_0 \left(\frac{\mu}{\mu-1} \right)^{1/2-\alpha},$$

откуда получаем:

$$q := q_+(\alpha) = \left(\frac{\mu-1}{\mu} \right)^{1/2-\alpha} \leq 1. \quad (5)$$

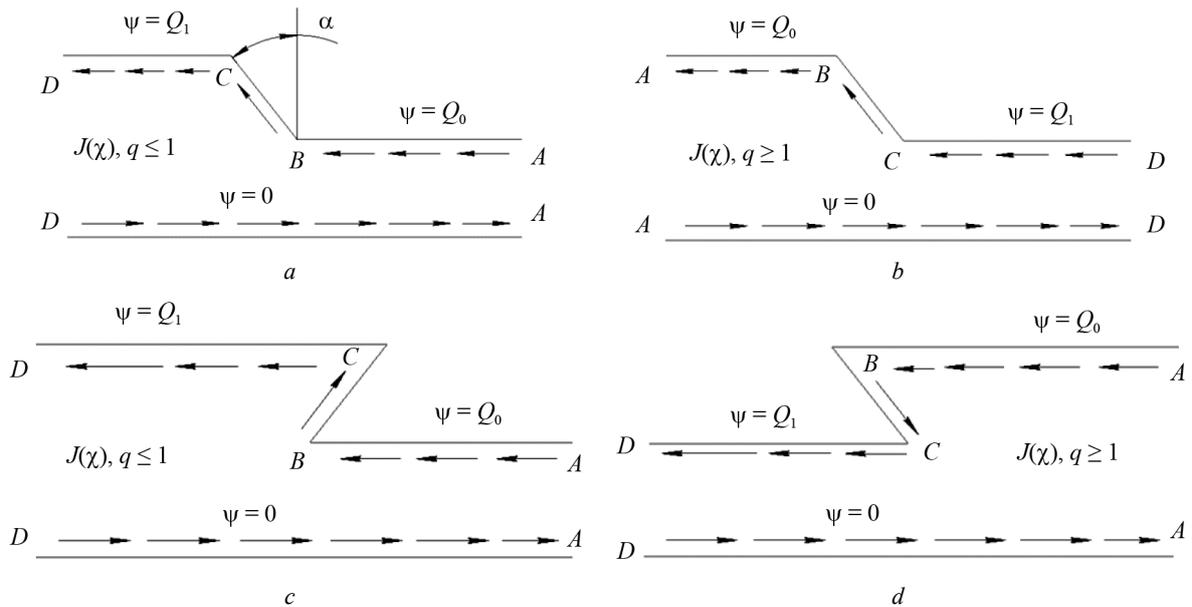


Рис. 3. Область $J(\chi)$ значений характеристической функции $\chi(z)$, потери и внешний энергообмен: a — присоединение расхода, $q = q_+ \in [0, 1]$; b — отделение расхода, $q = q_- \in [1, \infty)$, потери; c — присоединение расхода при наличии насоса; d — отделение расхода при наличии насоса

Fig. 3. The range of $J(\chi)$ values of characteristic function $\chi(z)$, losses and external energy exchange: a — a merging flow rate, $q = q_+ \in [0, 1]$; b — a splitting flow rate, $q = q_- \in [1, \infty)$, losses; c — a merging flow rate with a pump in operation; d — a splitting flow rate with a pump in operation

Следовательно, если $\alpha > 0$, то $q_+(\alpha) > q_+(0)$, $q_+(0) = \sqrt{\frac{\mu-1}{\mu}}$. Итак, наличие положительной диссипации ухудшает присоединение расхода, и коэффициент изменения расхода при увеличении угла α увеличивается. В случае же отрицательной диссипации, $\alpha < 0$, $q_+(\alpha) < q_+(0)$, и коэффициент изменения расхода тройника, частное Q_0/Q_1 , уменьшается, а присоединяемый расход $Q_e = (1 - q_+)Q_1$ увеличивается.

Величину параметра α можно связать с коэффициентом потерь на тройнике ζ , например, так: $\zeta = \text{tg}\alpha$, $\alpha > 0$, $h_r = \zeta \frac{u_1^2}{2g}$ и с напором насоса h_p , подающего жидкость в сечение EE или с откачивающим насосом в сечении $и$: $h_p = \text{tg}\alpha' \frac{u_e^2}{2g} > 0$, $\alpha' > 0$. Очевидно, в силу интеграла энергии для соединения потоков с источником мощности в точке E , $H_0Q_0 + H_eQ_e = (H_1 + h_r)Q_1 - h_pQ_e$, где $H_{0,1,e}$ — полные напоры в сечениях (точках) A, D, E соответственно. Источник механической мощности (насос) в рабочей точке своей нагрузочной характеристики удовлетворяет условию $h_r = h_p \frac{Q_e}{Q_1} = h_p(1 - q)$, или с учетом определения напоров h_r и h_p : $\text{tg}\alpha = (1 - q)^3 \text{tg}\alpha'$,

откуда получается, что $\alpha' = \text{arctg}(\text{tg}\alpha/(1 - q)^3)$, т.е. $\alpha' > \alpha$. Точно также при разделении потоков в прямом тройнике интеграл энергии имеет вид:

$$H_0Q_0 = H_eQ_e + (H_1 + h_r)Q_1 - h_pQ_e.$$

В рабочей точке насоса должно быть

$$h_r = h_p \frac{Q_e}{Q_1} = h_p(q - 1), \text{ и тогда}$$

$$\alpha' = \text{arctg}\left(\text{tg}\alpha/(1 - q)^3\right), 1 < q < 2.$$

Если $q > 2$, то доминирует диссипация $\alpha' < \alpha$. Поэтому при разделении потоков в прямом тройнике даже при наличии внешнего источника механической мощности при интенсивном отделении расхода ($q > 2$) доминирует диссипативный процесс; наоборот, при соединении потоков в прямом тройнике, даже при отсутствии внешнего источника механической мощности может сопровождаться увеличением полного напора транзитного потока. Действительно, в этом случае:

$$H_0Q_0 + H_eQ_e = (H_1 + h_r)Q_1,$$

$$H_0 = (H_1 + h_r)/q - H_e(1 - q)/q.$$

Пусть $H_e(1 - q) > h_r$ и тогда $H_1 > H_0$, что и требовалось доказать: ввод механической мощности в сечении EE с присоединяемым потоком может играть роль пассивного насоса.

Влияние размеров тройника на коэффициент изменения расхода

Пусть $|BC| = l$. Тогда, в силу (1):

$$\kappa := l/h = \frac{\sqrt{\lambda(1-\lambda)}}{\mu-\lambda} = \frac{\sqrt{\mu}-\sqrt{\mu-1}}{\sqrt[4]{\mu(\mu-1)}} = \sqrt[4]{\frac{\mu}{\mu-1}} - \sqrt[4]{\frac{\mu-1}{\mu}} \tag{6}$$

Если $\alpha = 0$, то, в силу формул (5) и (6):

$$\kappa = \frac{|1-q|}{\sqrt{q}} \tag{7}$$

В общем случае, $|\alpha| > 0$, вместо (7) справедлива формула:

$$\kappa = \frac{|1-q^{\frac{1}{1-2\alpha}}|}{q^{\frac{1}{2(1-2\alpha)}}}, \quad 0 \leq q < \infty \tag{8}$$

В силу (8), при соединении потоков:

$$q = \left(-\kappa/2 + \sqrt{1+\kappa^2/4}\right)^{2(1-2\alpha)}, \quad q = q_+ \in (0,1), \tag{9}$$

и при соединении потоков:

$$q = \left(\kappa/2 + \sqrt{1+\kappa^2/4}\right)^{2(1-2\alpha)}, \quad q = q_- \in (1,\infty). \tag{10}$$

Величина параметра κ принимает неотрицательные значения. При соединении потоков $0 < q < 1$. Тогда $\kappa(0) = \infty$, $\kappa(1) = 0$. При разделении потоков $1 < q < \infty$, $\kappa(1) = 0$, $\kappa(0) = \infty$.

Положительная диссипация ($\alpha > 0$) уменьшает влияние размера сечения EE на коэффициент изменения расхода q , наоборот, отрицательная диссипация увеличивает влияние размеров сечения EE на коэффициент изменения расхода. Как видно, формулы (9) и (10) тождественны, если параметру $\kappa = l/h$ приписывать отрицательное значение в слу-

чае присоединения расхода и положительное значение при отделении расхода. Иначе, пусть $\kappa' = |q-1|\kappa$. Тогда справедлива формула, объединяющая (9) и (10), (рис. 4):

$$q = \left(\kappa'/2 + \sqrt{1+\kappa'^2/4}\right)^{2(1-2\alpha)} \tag{11}$$

Скоростное поле

Рассмотрим соединение потоков. По определению сопряженная скорость:

$$\begin{aligned} -iu_y &= \frac{d\chi}{dz} = \frac{Q_0}{\pi} \left(\frac{t}{t-1}\right)^{1/2-\alpha} \frac{\pi}{h} \frac{t-\lambda}{\sqrt{t(t-1)}} = \\ &= u_0 \frac{t-\lambda}{t^\alpha (t-1)^{1-\alpha}}, \end{aligned} \tag{12}$$

где $u_0 := Q_0/h$ — скорость в сечении AA .

При разделении потоков вместо (12) получим:

$$\bar{u} = u_0 \frac{t-\lambda}{t^{1-\alpha} (t-1)^\alpha} \tag{13}$$

Введем характеристическую функцию движения на верхней полуплоскости $Jm(t) > 0$, $\chi^*(t)$.

По определению: $\chi^*(t) = \int_0^t \bar{u}(\tau) d\tau$, причем интегрирование ведется по линии, не проходящей через точки $t = \lambda$ и $t = \mu$.

Рассмотрим соединение потоков. Пусть $\alpha = 0$. Тогда, в силу (12):

$$\bar{u} = u_0 \frac{t-\lambda}{t-1}, \tag{14}$$

и, тривиально: $\chi^*(t)$ представляет движение на верхней полуплоскости параметра t как суперпозицию плоского однородного потока, имеющего скорость u_0 , и логарифмической особенности в точке $t = 1$. Точно также, при разделении потоков в отсутствие диссипации:

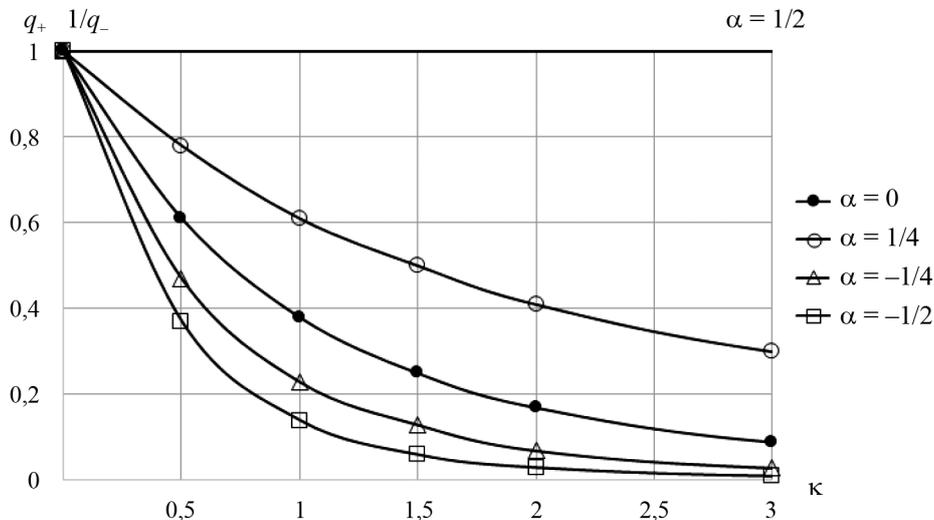


Рис. 4. Влияние размеров тройника на коэффициент изменения расхода $q = q(\kappa)$

Fig. 4. The effect of tee dimensions on flow rate coefficient $q = q(\kappa)$

$$\bar{u} = u_0 \frac{t-\lambda}{t}, \quad (15)$$

и $\chi^*(t)$ представляет движение на верхней полуплоскости параметра t как суперпозицию плоского однородного потока, имеющего скорость u_0 , и логарифмической особенности в точке $t = 0$.

Видоизменение области $J(\chi)$

Видоизменение области $J(\chi)$ — полоса с одним разрезом (см. рис. 5). В случае соединения потоков сохраняется точка B с прообразом $t = 0$. Точка C с прообразом $t=1$ пропускается, и соединение потоков происходит в точке B (рис. 5, *a*). В этом случае конформное отображение четырехугольника $ABDE$ на верхнюю полуплоскость $Im(t)>0$ имеет вид:

$$\chi(t) = \frac{Q_0}{\pi} \int_0^t \frac{\tau d\tau}{(\tau-\lambda)(\tau-\mu)}, \quad (16)$$

и тогда получается:

$$Q_1 = Q_0 \frac{\mu}{\mu-\lambda}, \quad q = q_+ = \sqrt{\frac{\mu-1}{\mu}},$$

т.е. формула (5) $\alpha = 0$. И точно также, в случае отделения потоков, (см. рис. 5, *b*):

$$\chi(t) = \frac{Q_0}{\pi} \int_0^t \frac{(\tau-1) d\tau}{(\tau-\lambda)(\tau-\mu)}, \quad (17)$$

и для коэффициента q_- получаем $q = q_- = \sqrt{\frac{\mu}{\mu-1}}$,

т.е. случай «идеального», без потерь, отделения потоков. В полосе с разрезом мы не можем учесть диссипацию и приток мощности. В остальном эта схема эквивалентна схеме полосы с уступом.

Полоса с двумя разрезами и полное соответствие точек при конформном отображении $J(\chi) \rightarrow Jm(t) > 0$, ни одна точка $J(z)$ не исключается

Рассмотрим слияние потоков (рис. 6 *a, c, e*). Область $D(\chi)$ изображается пятиугольником $ABCDE$, $(ABCDE) = 3$. При наличии диссипации точка C находится правее точки B , при наличии притока меха-

нической мощности — левее точки B , в идеальном случае точка C не имеет выноса влево и вправо.

Конформное отображение $J(\chi) \rightarrow Jm(t) > 0 = D(t)$ имеет вид:

$$\chi(t) = \frac{Q_0}{\pi} \int_0^t \frac{\tau(\tau-1) d\tau}{(\tau-\lambda)(\tau-\mu)^2}. \quad (18)$$

Тогда, вычисляя главное значение (18) при $t = \lambda$, получим:

$$Q_1 - Q_0 = Q_0 \frac{\lambda(1-\lambda)}{(\mu-\lambda)^2},$$

откуда следует:

$$q = q_+(\mu) = \frac{\sqrt{\mu(\mu-1)}}{2\mu-1-\sqrt{\mu(\mu-1)}}. \quad (19)$$

Очевидно, всегда $0 < q_+(\mu) < 1$, $1 < \mu < \infty$, причем $q_+(1) = q_+(\infty) - 1 = 0$.

При отделении расходов пятиугольник $ABCDE$ ($D(\chi)$) изображен на рис. 6 *b, d, f*. Отображение $D(\chi) \rightarrow Jm(t) > 0$ совпадает с выражением (18), для коэффициента изменения расхода вместо (19) получается выражение:

$$q = q_-(\mu) = \frac{\sqrt{\mu(\mu-1)}}{3\sqrt{\mu(\mu-1)} - 2\mu + 1}. \quad (20)$$

При отделении потоков $1 < q_-(\mu) < \infty$, причем $q_-(\infty) = 1$, $q_-(\mu_*) = \infty$, $\mu_* = 1/2(1+3/\sqrt{5}) > 1$, т.е. $1 < \mu_* < \mu < \infty$.

Формула (6) сохраняет силу, значит:

$$\kappa = \sqrt[4]{\frac{\mu}{\mu-1}} - \sqrt[4]{\frac{\mu-1}{\mu}},$$

и далее:

$$\mu = \frac{(\kappa/2 + \sqrt{1 + \kappa^2/4})^4}{(\kappa/2 + \sqrt{1 + \kappa^2/4})^4 - 1}.$$

Получается, что при соединении потоков, когда $1 < \mu < \infty$, допустимы все значения модуля тройника: $0 < \kappa < \infty$. Наоборот, при отделении потоков, когда

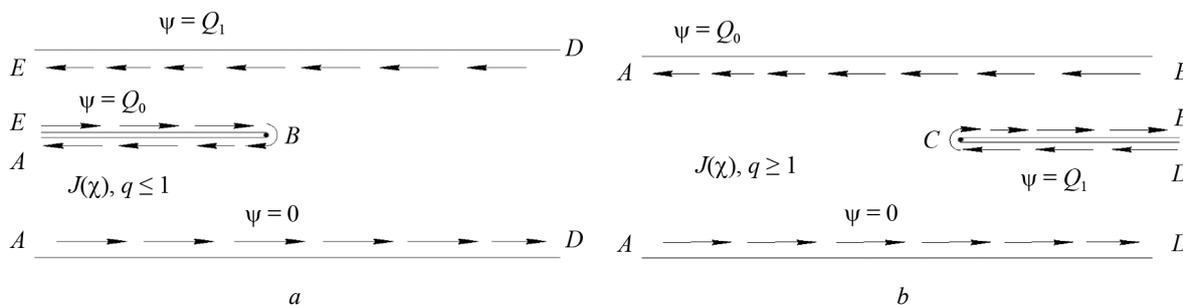


Рис. 5. Область $J(\chi)$ значений характеристической функции $\chi(z)$, полоса с одним разрезом: *a* — присоединение расхода, $q = q_+ \in [0, 1]$; *b* — отделение расхода, $q = q_- \in [1, \infty)$

Fig. 5. Area $J(\chi)$ of the values of characteristic function $\chi(z)$, a band with a single section: *a* — a merging flow rate, $q = q_+ \in [0, 1]$; *b* — a splitting flow rate, $q = q_- \in [1, \infty)$

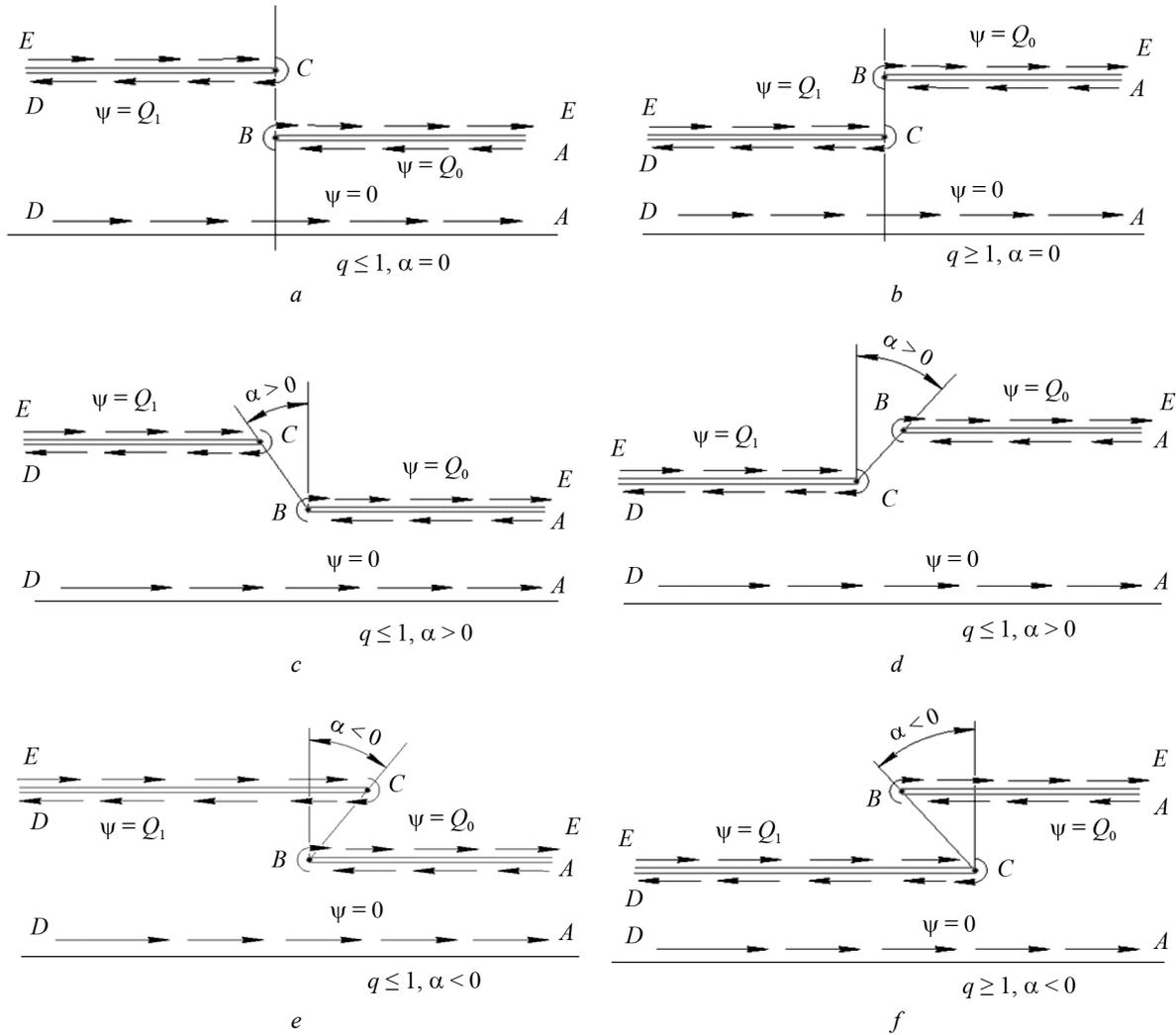


Рис. 6. Область $J(\chi)$ значений характеристической функции $\chi(z)$ с двумя разрезами a, b относится к тройнику без потерь; c, d — к тройнику с потерями; e, f — к тройнику с внешним энергообменом

Fig. 6. The range of $J(\chi)$ values of characteristic function $\chi(z)$ having two sections: a, b refer to the loss-free tee; c, d — refer to the lossy tee; e, f — refer to the tee that has external energy exchange

$\mu_* < \mu < \infty$, значение модуля κ ограничено сверху числом

$$\begin{aligned} \kappa_* &= \sqrt[4]{\frac{\mu_*}{\mu_* - 1}} - \sqrt[4]{\frac{\mu_* - 1}{\mu_*}} = \\ &= \sqrt[4]{\frac{3/\sqrt{20} + 1/2}{3/\sqrt{20} - 1/2}} - \sqrt[4]{\frac{3/\sqrt{20} - 1/2}{3/\sqrt{20} + 1/2}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt[4]{9/20 - 1/4}} = 1,43 > 1, \end{aligned}$$

$0 < \kappa < \kappa_*$. Если модуль тройника равен κ_* , то $Q_e = Q_0$, и правее сечения CC расход равен 0.

В исходной постановке задан один из транзитных расходов, например, расход в сечении $D-D$, Q_1 . Найти остальные расходы, в предположении, что полный напор в сечении $D-D$ сводится к скоростному напору. Тогда полный напор H_0 в сечении $A-A$ равен $H_0 = \nabla_0 + \frac{Q_0^2}{2gh^2}$, полный напор в сечении $E-E$,

H , равен $H_e = \nabla_e + \frac{Q_e^2}{2gh^2\kappa^2}$. При соединении потоков в тройнике без потерь выполняется интеграл энергии:

$H_0Q_0 + H_eQ_e = H_1Q_1$,

$$\left(\nabla_0 + \frac{Q_0^2}{2gh^2}\right)Q_0 + \left(\nabla_e + \frac{Q_e^2}{2gh^2\kappa^2}\right)Q_e = \frac{Q_1^3}{2gh^2}. \quad (21)$$

Пусть заданы ∇_0 и Q_1 , κ , h . Тогда отметка ∇_e легко находится из равенства (21):

$$\nabla_e = \frac{\frac{Q_1^2}{(2gh^2)} - \left(\nabla_0 + \frac{Q_1^2}{(2gh^2)}\right) \times \times q - (1-q)^3 \frac{Q_1^3}{(2gh^2\kappa^2)}}{1-q}, \quad (22)$$

$0 < q < 1$,

где, в силу (9), $q = \left(-\kappa/2 + \sqrt{1 + \kappa^2/4}\right)^2$.

Обозначим: $\varepsilon_i = \frac{2gh^2 \nabla_i}{Q_1^2}$, $i = 0, e$ (числа Эйлера)

$\varepsilon_i = \frac{2gh^2 \nabla_i}{Q_1^2}$, $i = 0, e$ и тогда, в силу (22):

$$\varepsilon_e = \frac{1 - qE_0 - q^3 - (1 - q)^3 / \kappa^2}{1 - q}. \quad (23)$$

Если потери при соединении потоков отделены от нуля, то равенство (23) принимает вид:

$$\varepsilon_e = \frac{1/\phi^2 - qE_0 - q^3 - (1 - q)^3 / \kappa^2}{1 - q},$$

$$\phi^2 = \frac{1}{1 + \zeta_r} < 1, \zeta_r > 0. \quad (24)$$

Если в сечении $D-D$ имеется также насос, откачивающий жидкость в сечении $D-D$, коэффициент напора которого равен ζ_p , то в формуле (24) следует

положить $\phi^2 = \frac{1}{1 + \zeta_r - \zeta_p}$. В идеальном случае,

когда $\phi = 1$, $\zeta_p = \zeta_r$, формулы (24) и (23) совпадают.

Итак, получается ожидаемый результат: *при малых значениях модуля κ тройника, в сечении $E-E$, вообще говоря, образуется вакуум: тройник работает как инжектор (элеватор), подсасывая жидкость из сечения $E-E$. Потери мощности потока снижают вакуум, а откачивание жидкости вакуум увеличивает.*

В случае деления потоков в прямом простом тройнике пусть даны ∇_0 , h , κ , $\nabla_1 = 0$, Q_1 . Найти ∇_e . Пусть потерь нет. Интеграл энергии имеет вид:

$$\left(\nabla_0 + \frac{Q_0^2}{2gh^2} \right) Q_0 = \left(\nabla_e + \frac{Q_e^2}{2gh^2 \kappa^2} \right) Q_e + \frac{Q_1^3}{2gh^2}. \quad (25)$$

Тогда статический напор ∇_e исключается из равенства (25):

$$\varepsilon_e = \frac{q\varepsilon_0 + q^3 - 1 - (q-1)^3 / \kappa^2}{q-1}, \quad q > 1, \quad (26)$$

где ε в силу (10): $q = \left(\kappa / 2 + \sqrt{1 + \kappa^2 / 4} \right)^2$. При наличии потерь или насоса вместо (26) справедливо тождество:

$$\varepsilon_e = \frac{q\varepsilon_0 + q^3 - 1/\phi^2 - (q-1)^3 / \kappa^2}{q-1}, \quad (27)$$

причем, если $\phi < 1$ (только потери), статический напор в сечении $E-E$ уменьшается, а при наличии

насоса вакуум увеличивается, так как допускается неравенство $\phi > 1$.

В гидравлических справочниках приводятся так называемые *коэффициенты изменения напора на проход* ζ_{01} и на поворот ζ_{e1} . Пусть потери мощности в тройнике исчисляются в долях скоростного напора в сечении $D-D$. Тогда для соединения потоков справедливо тождество: $\zeta_r = q\zeta_{01} + (1 - q)\zeta_{e1}$, причем коэффициент потерь и коэффициенты изменения расхода относятся к скоростному напору $\frac{Q_1^2}{2gh^2}$ в сечении $D-D$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для практических задач достаточно отображения пятиугольника $ABCDE$, $D(z)$, стилизуемого простой прямой тройник, на полосу с уступом $ABCD$, $D(c)$, с сохранением соответствия точек многоугольников. При этом:

- диссипация не уменьшает коэффициента изменения расхода при соединении потоков и не уменьшает коэффициента изменения расхода при разделении потоков;

- минимальное значение коэффициента изменения расхода $q = Q_0/Q_1$ при соединении потоков достигается при отсутствии диссипации и не превышает $q = -\kappa / 2 + \sqrt{1 + \kappa^2 / 4}$, $\kappa = |EE|/|DD|$;

- максимальное значение коэффициента изменения расхода при разделении потоков достигается при отсутствии диссипации и не меньше, чем $q = \kappa / 2 + \sqrt{1 + \kappa^2 / 4}$;

- диссипация в тройнике обусловлена отрывами потока от вершины угла B при соединении потоков и отрывом от вершины угла C при соединении потоков. Гидравлические потери не уменьшают коэффициент изменения расхода $q = q_+$ при соединении потоков и не увеличивают коэффициента изменения расхода $q = q_-$ при разделении потоков;

- введение в тройник внешней механической мощности (насоса) при соединении потоков всегда приводит к уменьшению коэффициента изменения расхода q_+ ; в случае разделения расходов введение внешней механической мощности увеличивает коэффициент изменения расхода в промежутке $1 < q_- < 2$ и не увеличивает, если $q_- > 2$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Singh L., Singh S.N., Sinha S.S. Effect of slot-guidance and slot-area on air entrainment in a conical ejector diffuser for infrared suppression // Journal of Applied Fluid Mechanics. 2019. Vol. 12. Issue 4. Pp. 1303–1317. DOI: 10.29252/jafm.12.04.29326

2. Goodfellow H.D., Tähti E. PREFACE. Industrial ventilation design guidebook, 2001. 1555 p. DOI: 10.1016/B978-012289676-7/50003-5

3. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A., Azarov V.N., Uvarov V.A. Methods of reducing the power

requirements of ventilation systems. Part 4. Theoretical prerequisites for the creation of dust localizing devices with Swirling Air Flows // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2014. Vol. 55. Issue 4. Pp. 365–370. DOI: 10.1007/s11148-014-9728-6

4. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. *Industrial ventilation: a manual of recommended practice for operation and maintenance*, 2007.

5. *Burgess W.A., Ellenbecker M.J., Treitzman R.D.* Ventilation for control of the work environment: Second Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2004. DOI: 10.1002/0471667056

6. *Cao Z., Wang Y., Duan M., Zhu H.* Study of the vortex principle for improving the efficiency of an exhaust ventilation system // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 142. Pp. 39–48. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.03.007

7. *Yang Y., Wang Y., Song B., Fan J., Cao Y.* Stability and accuracy of numerical investigation of droplet motion under local ventilation airflow // *Building and Environment*. 2018. Vol. 140. Pp. 32–42. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.05.023

8. *Идельчик И.Е.* Гидравлические сопротивления. Физико-механические основы. М.: ГЭИ, 1954.

9. *Маккаев В.М., Коновалов И.М.* Гидравлика. Л.; М.: Речиздат, 1940. 644 с.

10. *Спицин И.П., Соколова В.А.* Общая и речная гидравлика. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 358 с.

11. *Maklakov D.V., Posohin V.N., Safiullin R.G., Kareeva J.R.* Intake rate through openings in the side wall of the duct // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. No. 94 (2). Pp. 65–80. DOI: 10.18720/MCE.94.6

12. *Гуревич Г.Б.* Теория струй идеальной жидкости. М.: Наука, 1979. 536 с.

13. *Голубев В.В.* Лекции по аналитической теории дифференциальных уравнений. М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1950, 436 с.

14. *Береславский Э.Н.* Об изменении области комплексной скорости в некоторых задачах фильтрации при наличии испарения или инфильтрации

на свободную поверхность // *Известия высших учебных заведений. Математика*. 2016. № 12. С. 26–35.

15. *Береславский Э.Н.* Моделирование движения грунтовых вод из котлованов, огражденных шпунтами Жуковского // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*. 2017. Т. 13. № 2. С. 124–137. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2017.201

16. *Береславский Э.Н., Дудина Л.М.* О движении грунтовых вод к несовершенной галерее при наличии испарения со свободной поверхности // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2017. Т. 4. № 4. С. 654–663. DOI: 10.21638/11701/spbu01.2017.413

17. *Береславский Э.Н.* Исследование влияния испарения или инфильтрации на свободную поверхность грунтовых вод в некоторых задачах подземной гидромеханики // *Математическое моделирование*. 2017. Т. 29. № 8. С. 17–28.

18. *Береславский Э.Н., Дудина Л.М.* О движении грунтовых вод к несовершенной галерее при наличии испарения со свободной поверхности // *Математическое моделирование*. 2018. Т. 30. № 2. С. 99–109. DOI: 10.21638/11701/spbu01.2017.413

19. *Береславский Э.Н., Дудина Л.М.* Задача фильтрации в прямоугольной перемычке с частично непроницаемой вертикальной стенкой // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2019. Т. 6. № 2. С. 288–297. DOI: 10.21638/11701/spbu01.2019.211

20. *Береславский Э.Н.* Исследование изменения области комплексной скорости в некоторых задачах теории фильтрации // *Математическое моделирование*. 2016. Т. 28. № 1. С. 33–46.

21. *Береславский Э.Н., Пестерев Е.В.* О некоторых моделях течения жидкости из строительных котлованов // *Математическое моделирование*. 2014. Т. 26. № 12. С. 81–96.

22. *Павловский Н.Н.* Собрание сочинений. Т. 2. М.; Л.: Изд-во Акад. Наук СССР, 1956. 772 с.

Поступила в редакцию 28 сентября 2020 г.

Принята в доработанном виде 6 ноября 2020 г.

Одобрена для публикации 20 ноября 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Михаил Романович Петриченко** — доктор технических наук, профессор, Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства, Инженерно-строительный институт; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 37262, Scopus: 56426211200, ResearcherID: AAI-8907-2020, ORCID: 0000-0002-3541-0072; fonpetrich@mail.ru;

Ольга Александровна Соловьева — кандидат технических наук, старший преподаватель, Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства, Инженерно-строительный институт; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 703529, Scopus: 56829344800, ResearcherID: C-5456-2017, ORCID: 0000-0001-5746-3071; Solovyeva.aa@yandex.ru.

REFERENCES

1. Singh L., Singh S.N., Sinha S.S. Effect of slot-guidance and slot-area on air entrainment in a conical ejector diffuser for infrared suppression. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2019; 12(4):1303-1317. DOI: 10.29252/jafm.12.04.29326.
2. Goodfellow H.D., Tähti E. *PREFACE. Industrial ventilation design guidebook*. 2001; 1555. DOI: 10.1016/B978-012289676-7/50003-5
3. Logachev I.N., Logachev K.I., Averkova O.A., Azarov V.N., Uvarov V.A. Methods of reducing the power requirements of ventilation systems. Part 4. Theoretical Prerequisites for the creation of dust localizing devices with Swirling Air Flows. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2014; 55(4):365-370. DOI: 10.1007/s11148-014-9728-6
4. *American Conference of Governmental Industrial Hygienists*. Industrial ventilation: a manual of recommended practice for operation and maintenance, 2007.
5. Burgess W.A., Ellenbecker M.J., Treitman R.D. *Ventilation for Control of the Work Environment: Second Edition*. John Wiley & Sons, Inc., 2004. DOI: 10.1002/0471667056
6. Cao Z., Wang Y., Duan M., Zhu H. Study of the vortex principle for improving the efficiency of an exhaust ventilation system. *Energy and Buildings*. 2017; 142:39-48. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.03.007
7. Yang Y., Wang Y., Song B., Fan J., Cao Y. Stability and accuracy of numerical investigation of droplet motion under local ventilation airflow. *Building and Environment*. 2018; 140:32-42. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.05.023
8. Idel'chik I.E. *Hydraulic resistances. Physical and mechanical bases*. Moscow, GEI, 1954. (rus.).
9. Makkaveev V.M., Konovalov I.M. *Hydraulics*. Leningrad; Moscow, Rechizdat, 1940; 644. (rus.).
10. Spicin I.P., Sokolova V.A. *General and river hydraulics*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1990; 376. (rus.).
11. Maklakov D.V., Posohin V.N., Safiullin R.G., Kareeva J.R. Intake rate through openings in the side wall of the duct. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 94(2):65-80. DOI: 10.18720/MCE.94.6
12. Gurevich G.B. *Theory of jets in an ideal fluid*. Moscow, Science, 1979; 536. (rus.).
13. Golubev V.V. *Lectures on the analytical theory of differential equations*. Moscow; Leningrad, State. publishing house of technical theory. lit., 1950; 436. (rus.).
14. Bereslavskij E.N. Transformation of complex velocity area in some problems of filtration in presence of evaporation or infiltration to free surface. *Izvestiya Vysshih Uchebnyh Zavedenij. Matematika*. 2016; 12:26-35. (rus.).
15. Bereslavskij E.N. Modeling the movement of groundwater from the pits, surrounded with piles of Zhukovsky. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*. 2017; 13(2):124-137. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2017.201 (rus.).
16. Bereslavskij E.N., Dudina L.M. About flow of ground water to imperfect gallery in the presence of evaporation with a free surface. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*. 2017; 4(4):654-663. DOI: 10.21638/11701/spbu01.2017.413 (rus.).
17. Bereslavskij E.N. The research of the effect of evaporation or infiltration on the free surface groundwater and in some problems of underground hydro-mechanics. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2017; 29(8):17-28. (rus.).
18. Bereslavskij E.N., Dudina L.M. About flow of ground water to imperfect gallery in the presence of evaporation with a free surface. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2018; 30(2):99-109. DOI: 10.21638/11701/spbu01.2017.413 (rus.).
19. Bereslavskij E.N., Dudina L.M. Problem of filtration in a rectangular web with a partially impenetrable vertical wall. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*. 2019; 6(2):288-297. DOI: 10.21638/11701/spbu01.2019.211 (rus.).
20. Bereslavskij E.N. The research of change in the complex velocity area in some problems of filtration theory. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2016; 28(1):33-46. (rus.).
21. Bereslavskij E.N., Pesterev E.V. On some models of the flow of construction ditch. *Mathematical modeling*. 2014; 26(12):81-96. (rus.).
22. Pavlovsky N.N. *Collected Works. Vol. 2*. Moscow; Leningrad, Publishing house Acad. Science USSR, 1956; 772. (rus.).

Received September 28, 2020.

Adopted in revised form on November 6, 2020.

Approved for publication on November 20, 2020.

BIONOTES: **Mihail R. Petrichenko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Higher School of Hydraulic and Power Engineering Construction, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 37262, Scopus: 56426211200, ResearcherID: AAI-8907-2020, ORCID: 0000-0002-3541-0072; fonpetrich@mail.ru;

Ol'ga A. Solov'yova — Candidate of Technical Sciences, senior lecturer, Higher School of Hydraulic and Power Engineering Construction, Civil Engineering Institute; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnic st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 703529, Scopus: 56829344800, ResearcherID: C-5456-2017, ORCID: 0000-0001-5746-3071; Solovyeva.aa@yandex.ru.

Выбор мембран и сервисных реагентов для мембранных установок, применяемых для обработки подземных вод

В.А. Головесов¹, Г.Я. Рудакова², А.Г. Первов¹, Д.В. Спицов¹

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

² Научный центр «Малотоннажная химия»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Описываются случаи применения метода обратного осмоса для очистки подземных вод с целью получения питьевой воды. Представлены технологии применения установок обратного осмоса, отмечены недостатки и проблемы, с которыми сталкиваются водоканалы, использующие установки обратного осмоса: импортные реагенты, высокие эксплуатационные затраты, низкая надежность, сброс концентрата. Изучены причины возникновения проблем. Цель работы — изучение эффективности действия ингибиторов в сочетании с использованием различных мембран, сокращение эксплуатационных расходов за счет снижения затрат на реагенты, сброс концентрата и потребление электроэнергии.

Материалы и методы. Проведены экспериментальные исследования эффективности ингибиторов в разных дозах для случаев применения разных мембран. Описана экспериментальная методика, позволяющая определить скорости образования осадка карбоната кальция в зависимости от значения коэффициента снижения объема исходной воды в установке. Для экономического сравнения использованы оценки затрат в зависимости от параметров установок: коэффициента снижения объема, рабочего давления, дозы ингибитора, типа мембран.

Результаты. Получены основные зависимости скоростей образования карбоната кальция, позволяющие определить расходы реагентов, концентрата и расхода электроэнергии. На примере двух составов подземной воды приведены составы очищенной воды с применением различных мембран и установлены требуемые соотношения объемов исходной воды и очищенной с применением различных мембран. Определены объемы эксплуатационных затрат.

Выводы. Выявлено, что для снижения жесткости подземной воды эффективно применение наночистых мембран, что дает снижение эксплуатационных затрат, а также позволяет снизить скорость осадкообразования и использовать уменьшенные дозы ингибиторов. Несмотря на увеличение количества мембранных аппаратов, общее значение эксплуатационных затрат установок снижается за счет уменьшения затрат на реагенты (ингибиторы и моющие растворы), электроэнергию и сброс концентратов в канализацию.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обратный осмос, нанофильтрация, ингибиторы осадкообразования, осадкообразование на мембранах, утилизация концентрата установок обратного осмоса, удаление жесткости

Благодарности: Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за финансовую поддержку работы (гранты РФФИ № 19-08-00982А и 19-38-90078).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Головесов В.А., Рудакова Г.Я., Первов А.Г., Спицов Д.В. Выбор мембран и сервисных реагентов для мембранных установок, применяемых для обработки подземных вод // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 11. С. 1556–1569. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1556-1569

Selection of membranes and reagents for membrane facilities operation to treat ground water

Vladimir A. Golovesov¹, Galina Ya. Rudakova², Alexei G. Pervov¹, Dmitry V. Spitsov¹

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

² Scientific Center “Low-tonnage chemistry”; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. New techniques to operate reverse osmosis facilities are presented as well as problems and disadvantages are discussed that vodocanals face with, such as: imported chemicals, high operational costs, low reliability, concentrate handling and disposal. Main reasons that cause problems are understood. Experiments are described that provide evaluation of reagents efficiencies and ways to significantly decrease concentrate flows and reduce operational costs. A newly developed approach is presented that uses nanofiltration membranes and enables us to reduce chemical, energy and concentrate discharge costs. Goals — the investigation of antiscaling efficiencies together with use of membranes with different properties to reduce operational costs due to low chemical dosing, low pressure and energy consumption.

Materials and methods. Experiments are conducted to evaluate inhibiting efficiencies using different antiscalant doses and different membranes. Experimental method is describe to calculate rates of calcium carbonate formation as a function of coefficient K (Initial Volume Reduction coefficient) value. To provide economical comparison of different water treatment techniques, operational costs are evaluated depending on operational parameters, such as: coefficient K, working pressure antiscalant dose values as well as membrane type used.

Results. Main relationships are obtained of calcium carbonate scaling rates that provide chemical consumption, concentrate flow rate and power consumption. Using two ground water compositions examples are calculated to predict product water composition for different membranes and of feed water and product water flows. Operational costs are calculated for both cases.

Conclusions. To reduce hardness of the ground water nanofiltration membranes can be efficiently applied that ensures low operational costs of membrane facility. Application of nanofiltration membranes possess lower scaling propensities and therefore enables us to use smaller doses of antiscalants added to feed water. Despite the increased amount of membrane elements required to furnish membrane facility, the total operational costs amount is lower due to lower chemical costs (antiscalants and cleaning agents), energy costs as well as payments for concentrate disposal.

KEYWORDS: reverse osmosis, nanofiltration, antiscalants, scaling on membranes, reverse osmosis concentrates utilization, water softening.

Acknowledgements. The co-authors would like to express gratitude to the Russian Foundation for Basic Research for the financial support for this project (RFBR grants No. 19-08-00982A and 19-38-90078).

FOR CITATION: Golovesov V.A., Rudakova G.Ya., Pervov A.G., Spitsov D.V. The choice of membranes and reagents designated for membrane systems used to treat ground water. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(11):1556-1569. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1556-1569 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время для снабжения городов и поселений на территории Москвы и Подмосквья используют подземные воды. Традиционно для очистки подземных вод удаляли железо, далее происходили аэрация и последующее фильтрование [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 [3–6]. Кроме того, системы ионообменного умягчения (натрий-катионирования) имеют высокоминерализованные стоки, что создает проблему их сброса [4]. Помимо содержания в подземных водах Подмосквья железа и ионов жесткости, на ряде подземных водозаборов встречаются повышенные содержания фторид-ионов, ионов аммония, нитрат-ионов, стронция, лития, мышьяка и даже бора [5]. 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 для питьевого водоснабжения [7, 8]. 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 начинают применяться для обработки воды из скважин с высоким содержанием жесткости, стронция, фтора и других загрязнений, а также с повышенной минерализацией (величиной общего солесодержания выше 1000 мг/л). Опыт эксплуатации первых установок обратного осмоса водоканалами Московской области показал, что сотрудники водоканалов столкнулись с двумя основными трудностями: закупкой сервисных реагентов и большими затратами на сброс концентратов в систему городской канализации [5, 6, 8]. Поэтому для успешного решения вопросов водоснабжения подмосковных городов следует, в первую очередь, решить эти две задачи.

Основным реагентом, используемым при эксплуатации систем обратного осмоса, являются ин-

гибиторы образования осадков малорастворимых солей, главным образом, карбоната кальция [9, 10]. Проблему с закупками ингибиторов создало то обстоятельство, что они поставляются рядом фирм, в основном зарубежными, и под разными торговыми марками [5, 11, 12]. Служба эксплуатации мембранной установки, после того, как запас поставленных ингибирующих веществ закончился, обычно объявляет тендерную закупку реагента именно этой модели и этой торговой марки, что часто оказывается сложным, так как фирмы, зарегистрировавшие свои торговые марки, «пропадают». В силу недостатка знаний и опыта водоканалы часто стоят перед выбором, какой химикат закупить, и есть ли риск, что он окажется менее эффективным, чем предыдущий.

Обычно, с течением времени (к концу второго года эксплуатации) показатели работы установки начинают ухудшаться, что связывают с неэффективным ингибитором другой торговой марки. Эти вопросы требуют разъяснения. В предыдущих публикациях нами описывались основные виды применяемых ингибиторов и результаты определения их эффективности [12–15]. Был сделан вывод, что эффективность зависит не от торговой марки, а от класса, к которому принадлежит ингибитор. Наиболее эффективными являются ингибиторы, принадлежащие к классу фосфонатов [5, 15]. Более эффективный из ингибиторов, выпускаемых отечественными производителями, — ингибитор марки «Аминат-К» [5, 15, 16], принадлежащий к классу фосфонатов и представляющий собой смесь натриевых солей фосфоновых кислот. Как показывают результаты проведенных исследований [15, 16] и сравнительных испытаний образцов ингибиторов наиболее известных марок и принадлежащих в основном к классам фосфонатов и акрилатов, эффективность в снижении скоростей образования на мембранах кристаллических осадков карбоната кальция отличается на 10–15 % [5]. Это значит, что период эксплуатации до проведения химических промывок также отличается на 10–15 %. Поэтому проблему представляет не тип ингибиторов, а умение эксплуатировать установку, своевремен-

но производя сервисные мероприятия [1, 3, 5], что дает возможность контролировать рост отложений на мембранах. Для контроля над количеством отложений следует не искать новый ингибитор, а совершенствовать технологическую схему с целью повышения эффективности работы, снижения эксплуатационных расходов и расходов концентратов.

В настоящее время используется схема с применением мембран обратного осмоса, что и является причиной всех проблем, связанных с высокими значениями эксплуатационных расходов и расходов концентратов.

В табл. 1 и 2 представлены примеры составов воды, отобранной из различных скважин г. Видное. Как видно из табл. 1, вода имеет высокое значение общей жесткости — 12 мг-экв/л, концентрация железа составляет 0,5–1,0 мг/л.

Традиционно поставщики установок поступают так: вода проходит обезжелезивание по «классической» схеме (с аэрацией и фильтрованием), после чего поступает на установку обратного осмоса (рис. 1), где разделяется на фильтрат и концентрат.

Как видно из табл. 1, при очистке воды с применением мембран обратного осмоса получается фильтрат с величиной общего солесодержания 15–20 мг/л и жесткости 0,05–0,1 мг/л. Если смешать фильтрат с исходной водой, прошедшей обезжелезивание в соотношении 1:1, то получится вода с величиной общего солесодержания 300 мг/л и значением общей жесткости 6,1 мг-экв/л (табл. 1).

Именно по этому принципу проектируются и работают системы обратного осмоса очистки подземных вод для целей питьевого водоснабжения [1, 7, 8, 15]. В зависимости от концентраций содержащихся в воде других загрязнений (фторидов, ионов аммония и др.) и эффективности их задержания обратноосмотическими мембранами может изменяться соотношение потоков исходной обезжелезенной воды и фильтрата установки обратного осмоса при их смешивании. В табл. 2 приведены химический состав одной из скважин г. Видное с «неблагоприятным» составом воды и составы воды после их обработки с применением мембран.

Табл. 1. Состав воды из скважины г. Видное и качество пермеата

Table 1. Chemical composition of groundwater (Vidnoe town) and permeate quality

Показатели Ingredients and properties	Исходная вода / Вода после обезжелезивания Feed water / Water subjected to de-ironing	Пермеат ОО Reverse osmosis (RO) permeate	После смешения пермеат ОО : исходная вода Reverse osmosis (RO) permeate after blending : feed water		Пермеат НФ Nano-scale filtered (NF) permeate	После смешения пермеат НФ : исходная вода Nano-scale filtered (NF) permeate after blending		Норматив СанПиН 2.1.4.1074-01 Sanitary rules and regulations standard 2.1.4.1074-01
			1:1	1:2		1:1	2:1	
			Ж _{общ.} , мг-экв/л Hardness _{general} , milligram-equivalents per liter	10,5		0,5	5,5	
Ca ²⁺ , мг-экв/л Ca ²⁺ , milligram-equivalents per liter	7,0	0,35	3,6	4,7	2,3	4,7	3,9	—
Mg ²⁺ , мг-экв/л Mg ²⁺ , milligram-equivalents per liter	3,5	0,18	1,9	2,3	1,2	2,3	2,0	—
Na ⁺ +K ⁺ , мг-экв/л Na ⁺ +K ⁺ , milligram-equivalents per liter	2,5	0,2	1,35	2,0	0,8	1,65	2,21	—
Cl ⁻ , мг-экв/л Cl ⁻ , milligram-equivalents per liter	2,5	0,3	1,1	2,1	0,8	1,65	2,9	350 мг/л / mg/l
SO ₄ ²⁻ , мг-экв/л SO ₄ ²⁻ , milligram-equivalents per liter	3,0	0,05	1,52	2,45	0,3	1,65	2,6	500 мг/л / mg/l
HCO ₃ ⁻ , мг-экв/л HCO ₃ ⁻ , milligram-equivalents per liter	7,5	0,35	3,92	5,7	2,5	5,0	6,7	—
Fe ²⁺ , мг/л / Fe ²⁺ , mg/l	1,4 / 0,1	0,01	0,05	0,01	0	0,05	0,16	0,3
F ⁻ , мг/л / F ⁻ , mg/l	1,6	0,1	0,85	1,24	0,6	1,1	1,4	—
Общее солесодержание, мг/л Total salt content, mg/l	740	53	399	520	280	510	430	1000

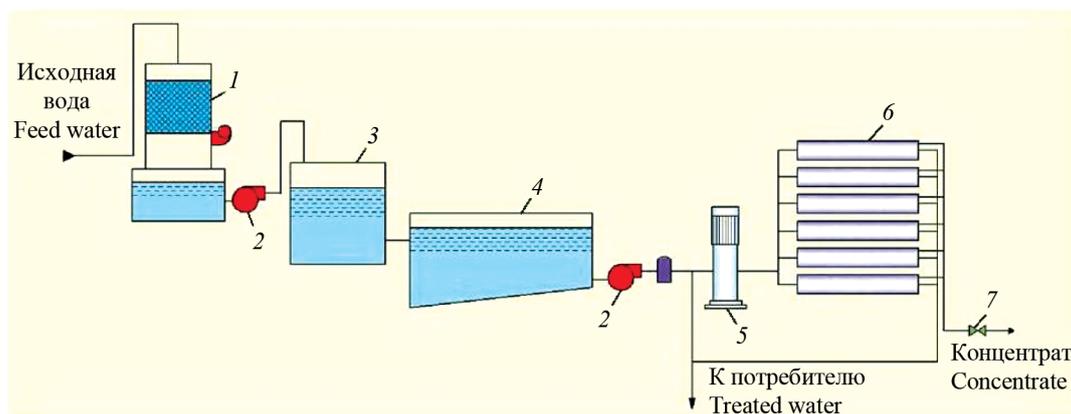


Рис. 1. Технологическая схема применения установок обратного осмоса для очистки подземных вод: 1 — аэратор; 2 — насос; 3 — механический фильтр; 4 — резервуар очищенной воды; 5 — рабочий насос высокого давления; 6 — установка обратного осмоса; 7 — регулирующий вентиль

Fig. 1. A flow diagram of a groundwater treatment system using reverse osmosis: 1 — aeration column; 2 — booster pump; 3 — sand filter; 4 — pure water tank; 5 — feed pump; 6 — reverse osmosis system; 7 — pressure regulation valve

Табл. 2. Состав воды из скважины, содержащей литий (г. Видное), и качество пермеата

Table 2. Composition of groundwater having high Lithium content (Vidnoe town) and permeate quality

Показатели Ingredients and properties	Исходная вода / Вода после обезжелезивания Feed water / Water subjected to de-ironing	Пермеат ОО RO permeate	После смешения пермеат ОО : исходная вода RO permeate after blending : feed water		Пермеат НФ NF permeate	Норматив СанПиН 2.1.4.1074-01 Sanitary rules and regulations standard 2.1.4.1074-01
			1:1	2:1		
Ж _{общ} , мг-экв/л Hardness _{general} , milligram-equivalents per liter	7,0	0,5	3,68	2,53	2,4	1,5–7,0
Ca ²⁺ , мг-экв/л Ca ²⁺ , milligram-equivalents per liter	4,8	—	—	—	—	—
Mg ²⁺ , мг-экв/л Mg ²⁺ milligram-equivalents per liter	2,20	—	—	—	—	—
Na ⁺ +K ⁺ , мг-экв/л Na ⁺ +K ⁺ , milligram-equivalents per liter	0,62	0,1	1,36	0,27	0,2	—
Cl ⁻ , мг-экв/л Cl ⁻ , milligram-equivalents per liter	0,2	0,03	1,12	0,85	0,1	350 мг/л
SO ₄ ²⁻ , мг-экв/л SO ₄ ²⁻ , milligram-equivalents per liter	0,6	0,01	0,3	0,21	0,07	500 мг/л
HCO ₃ ⁻ , мг-экв/л HCO ₃ ⁻ , milligram-equivalents per liter	7,1	0,33	3,68	2,6	2,4	—
Fe ²⁺ , мг/л Fe ²⁺ , mg/l	0,48 / 0,1	0,01	0,05	0,08	0	0,3
NH ₄ ⁺ , мг/л NH ₄ ⁺ , mg/l	0,03	—	0,01	0,01	0	0,50
Li, мг/л Li, mg/l	0,051	0,006	0,03	0,02	0,023	0,03
Общее соледержание, мг/л Total salt content, mg/l	637	32	330	343	220	—

Проблему создают 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 значения величины выхода фильтрата установок при обработке подземных вод (отношение расхода фильтрата к расходу обрабатываемой воды) не превышают 0,65–0,75. Увеличение выхода фильтрата ведет к повышению пересыщения по карбонату кальция в концентрате и повышению скорости осадкообразования [8]. Необходимой частью технологии является дозирование ингибиторов в исходную воду для предотвращения осадкообразования. Но полного предотвращения, как показывает опыт проведенных исследований [11], не удается добиться ни с каким видом ингибитора. В результате исследований и опыта эксплуатации установлено [12], что наиболее эффективно и рационально применять нанофильтрационные мембраны, которые специально были разработаны для целей питьевого водоснабжения. В табл. 1 и 2 показаны составы фильтратов в зависимости от величин выхода фильтрата. Как видно, даже при высоких значениях выхода фильтрата удается получить воду питьевого качества. Однако применение нанофильтрационных мембран пока встречается «в штывки» водоканалами, поскольку при принятой сейчас схеме (рис. 1) происходит экономия мембран (благодаря смешению мембраны обеспечивают только половину выбранной производительности). В случае необходимости удаления аммония или лития, они плохо удаляются нанофильтрационными мембранами (табл. 2). Та-

кой подход не учитывает, что годовые затраты по замене мембран часто оказываются ниже, чем затраты на электроэнергию и реагенты, а также на сброс концентрата в канализацию [4, 5]. Как неоднократно сообщалось в публикациях, применение нанофильтрационных мембран позволяет сократить расходы на предотвращение осадкообразования и увеличить значения выхода фильтрата установок, что дает возможность существенно сократить эксплуатационные затраты и повысить надежность работы мембранных установок в системах питьевого водоснабжения [5].

В настоящей работе предпринят шаг еще раз продемонстрировать экспериментально преимущество нанофильтрационных мембран в снижении опасности осадкообразования, и полученные в результате экспериментов данные для определения эксплуатационных затрат в случае применения обратного осмотического и нанофильтрационных мембран [1, 5]. На рис. 2 приведена разработанная авторами схема обработки подземных вод с применением нанофильтрационных мембран, позволяющая радикально сократить расходы концентрата [4, 5]. Отличительная черта технологии сокращения расхода концентрата — использование второй ступени обработки концентрата, использующей нанофильтрационные мембраны с низкой величиной селективности (рис. 2). Благодаря низкому значению селективности мембран на второй ступени процессы осадкообразования в мембранах второй ступени идут замедленно [5]. При этом пермеат мембранных аппаратов второй ступени, имеющий низкое качество и по своему составу приближающийся к составу исходной воды, направляется на вход в установку.

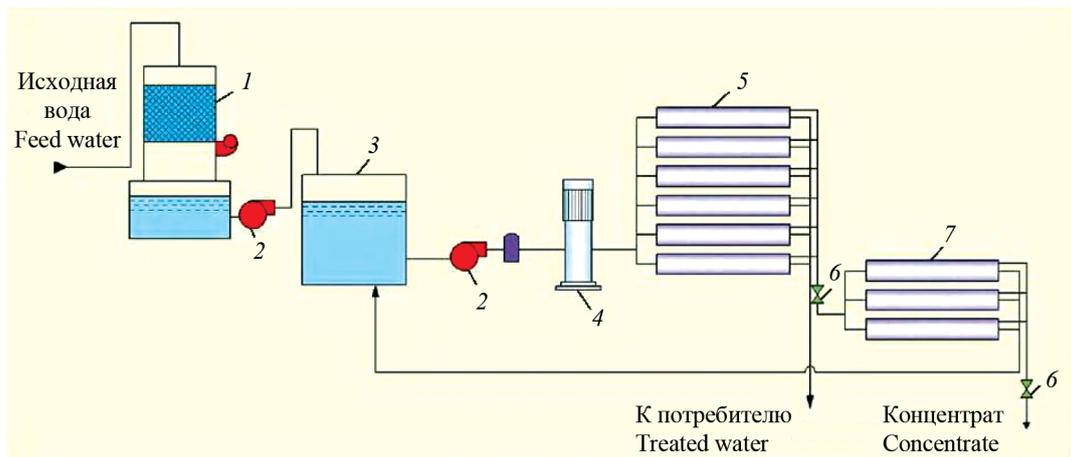


Рис. 2. Технологическая схема очистки подземных вод с применением метода нанофильтрации с блоком для сокращения расхода концентрата: 1 — аэратор; 2 — насос; 3 — механический фильтр; 4 — рабочий насос высокого давления; 5 — установка нанофильтрации; 6 — регулирующий вентиль; 7 — мембранный блок сокращения расхода концентрата

Fig. 2. A flow diagram of ground water treatment using the nanofiltration method and the concentrate flow reduction unit: 1 — aeration column; 2 — booster pump; 3 — sand filter; 4 — feed pump; 5 — nanofiltration unit; 6 — pressure regulation valve; 7 — concentrate flow reduction unit

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Цель проведения экспериментов — сравнение эффективности двух наиболее распространенных в отечественной практике ингибиторов: отечественного ингибитора Аминат-К (Траверс, Москва) и импортного ингибитора Nalco-191. Испытания проводились с применением различных доз ингибиторов, которые составляли 5, 3 и 1 мг/л по сухому веществу. Также испытания ингибиторов осуществлялись при обработке воды как с использованием обратноосмотических, так и нанофильтрационных мембран. Эксперименты проводились на воде московского водопровода. Использовались рулонные элементы стандарта 1812 с обратноосмотическими мембранами BLN и нанофильтрационными мембранами 70 NE производства компании CSM (Корея). Определение концентраций иона кальция производилось трилонометрическим титрованием; величины общего солевого содержания — кондуктометрическим методом с помощью портативного TDS-метра. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

Исходная вода в количестве 20 или 10 л помещалась в бак исходной воды 1, откуда насосом 2 подавалась в мембранный аппарат 3. В мембранном аппарате вода разделялась на фильтрат и концентрат. Концентрат возвращался обратно в бак 1, а пермеат (очищенная вода, фильтрат мембранного аппарата) собирался в баке сбора фильтрата 4. По мере нако-

пления 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 величины общего солевого содержания и концентраций кальция при различных значениях объемов исходной воды в баке 1: 20, 10, 5, 4 и 2 л. Отношение объема исходной воды, поступающего в установку V_n , к объему концентрата V_k в баке 1 в процессе работы установки называется коэффициентом снижения объема исходной воды K . Значение коэффициента снижения объема K является основной характеристикой работы мембранных установок, позволяющей определить соотношение потоков пермеата и концентрата. Величина K связана с еще одной характеристикой мембранных установок — выходом фильтрата (отношением расхода фильтрата V_ϕ к расходу исходной воды V_n) — соотношением: $K = 1/1 - V_\phi/V_n$. На рис. 4 и 5, а представлены графики полученных зависимостей значений концентраций кальция в концентрате и пермеате от значения коэффициента снижения объема K . Количество осадка карбоната кальция M , которое образовалось в мембранном аппарате в процессе эксперимента, определялось на основе массового баланса [5]:

$$M = V_n [Ca]_n - V_\phi [Ca]_\phi,$$

где $[Ca]_n$ и $[Ca]_\phi$ — концентрации кальция, соответственно, в исходной воде и пермеате. Поскольку се-

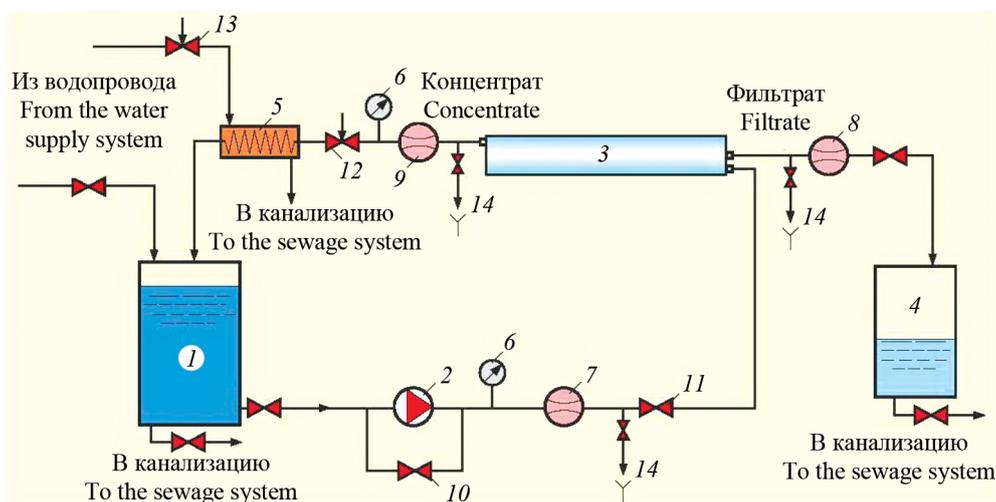


Рис. 3. Схема экспериментальной установки очистки воды с нанофильтрационными и обратноосмотическими мембранами: 1 — бак исходной воды; 2 — рабочий насос; 3 — рулонный мембранный элемент в корпусе; 4 — бак сбора фильтрата; 5 — теплообменник; 6 — манометр; 7 — ротаметр исходной воды; 8 — ротаметр фильтрата; 9 — ротаметр 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. 3. A flow diagram of an experimental unit equipped with reverse osmosis and nanofiltration membranes: 1 — feed water tank; 2 — feed pump; 3 — spiral wound membrane module in a pressure vessel; 4 — treated water tank; 5 — heat exchanger; 6 — pressure gauge; 7 — feed water flow meter; 8 — treated water flow meter; 9 — concentrate flow meter; 10 — bypass flow regulation valve; 11 — feed water flow regulation valve; 12 — concentrate flow regulation valve; 13 — cooling water regulation valve; 14 — sampler

лективность нанофильтрационных мембран по иону кальция ниже, чем обратноосмотических мембран, количество накапливаемых на нанофильтрационных мембранах (рис. 4, *b*) в процессе эксперимента значительно больше, чем на обратноосмотических мембранах (рис. 5, *b*). Для определения скоростей роста осадка карбоната кальция на мембранах построены зависимости количества осадка от времени эксперимента (рис. 4 и 5, *c*). Определение скоростей роста осадка на мембранах производится в соответствии с разработанной авторами методикой [15] и состоит в расчете значений тангенсов углов наклонов кривых зависимостей количества осадка M от времени T в различных точках (рис. 4 и 5, *d*).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 4 представлены результаты экспериментов и обработки экспериментальных данных

при сравнении эффективности снижения скоростей роста осадка карбоната кальция при обработке воды с применением мембран BLN. Как видно, ингибитор Аминат-К ни в чем не уступает Nalco 191.

Серьезное преимущество дает использование нанофильтрационных мембран. При этом уменьшается скорость осадкообразования и можно уменьшить дозы ингибиторов.

На рис. 5 показаны скорости роста осадка карбоната кальция при использовании мембран 70NE при дозах ингибитора Аминат-К 5,3 и 1 мг/л.

Очевидно, что скорости образования осадка меняются незначительно. При этом эффективность снижения осадков та же, что и при использовании ингибитора Nalco 191.

На рис. 6 представлены результирующие кривые, демонстрирующие преимущество описываемой технологии.

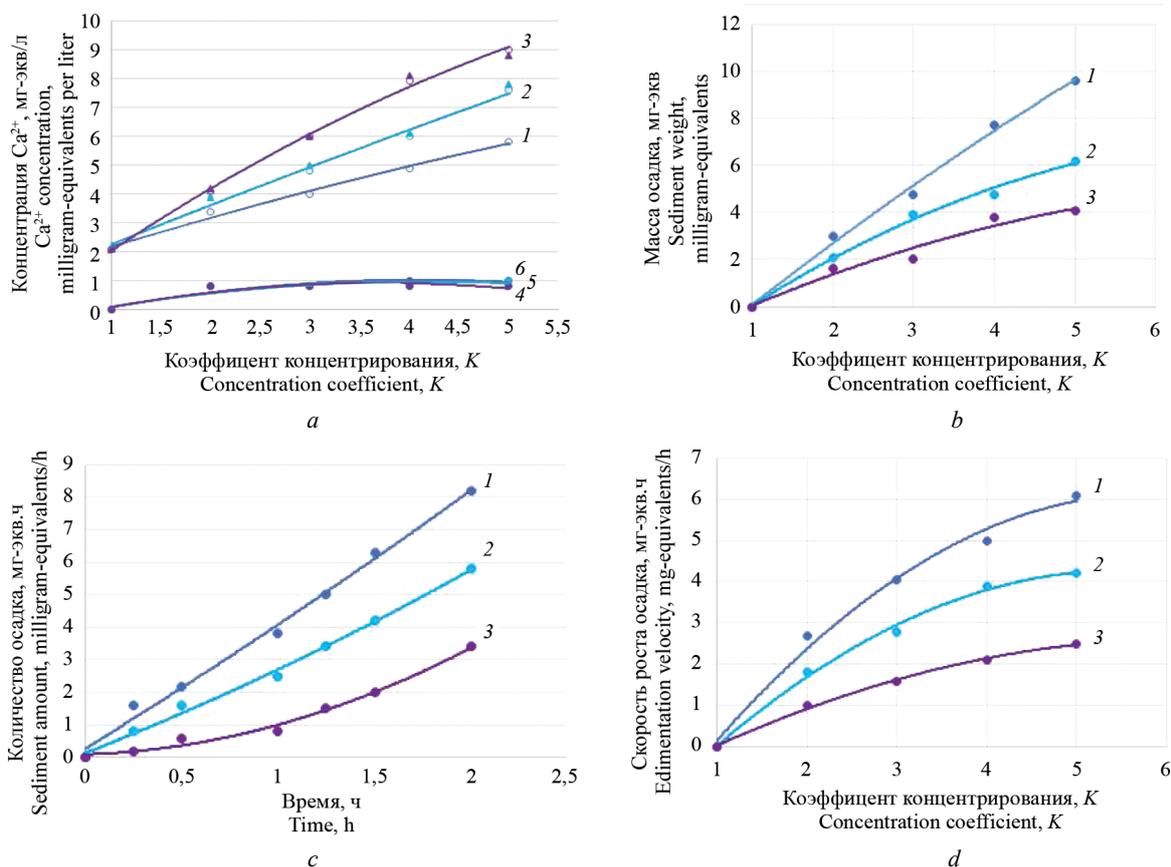


Рис. 4. Сравнение эффективности действия ингибиторов Аминат-К и Nalco-191 при обработке воды с применением нанофильтрационных мембран: 1 — без добавления ингибиторов; 2 — дозы ингибиторов 1 мг/л; 3 — дозы ингибиторов 5 мг/л; *a* — зависимость концентраций кальция в исходной воде и пермеате от величины K ; *b* — зависимость количества образовавшегося осадка M от величины K ; *c* — зависимость количества образовавшегося осадка M от времени эксперимента T ; *d* — зависимость скорости роста осадка от величины K

Fig. 4. Water treatment efficiency of Aminat-K and Nalco-191 inhibitors with nanofiltration membranes applied: 1 — no inhibitors added; 2 — 1 mg/l of inhibitor added; 3 — 5 mg/l of inhibitor added; *a* — ratio of calcium concentration in the feed water and in the permeate to the value of coefficient K ; *b* — ratio of sediment M amount to the value of K ; *c* — ratio of sediment M amount to experiment time T ; *d* — ratio of sedimentation velocity to K value

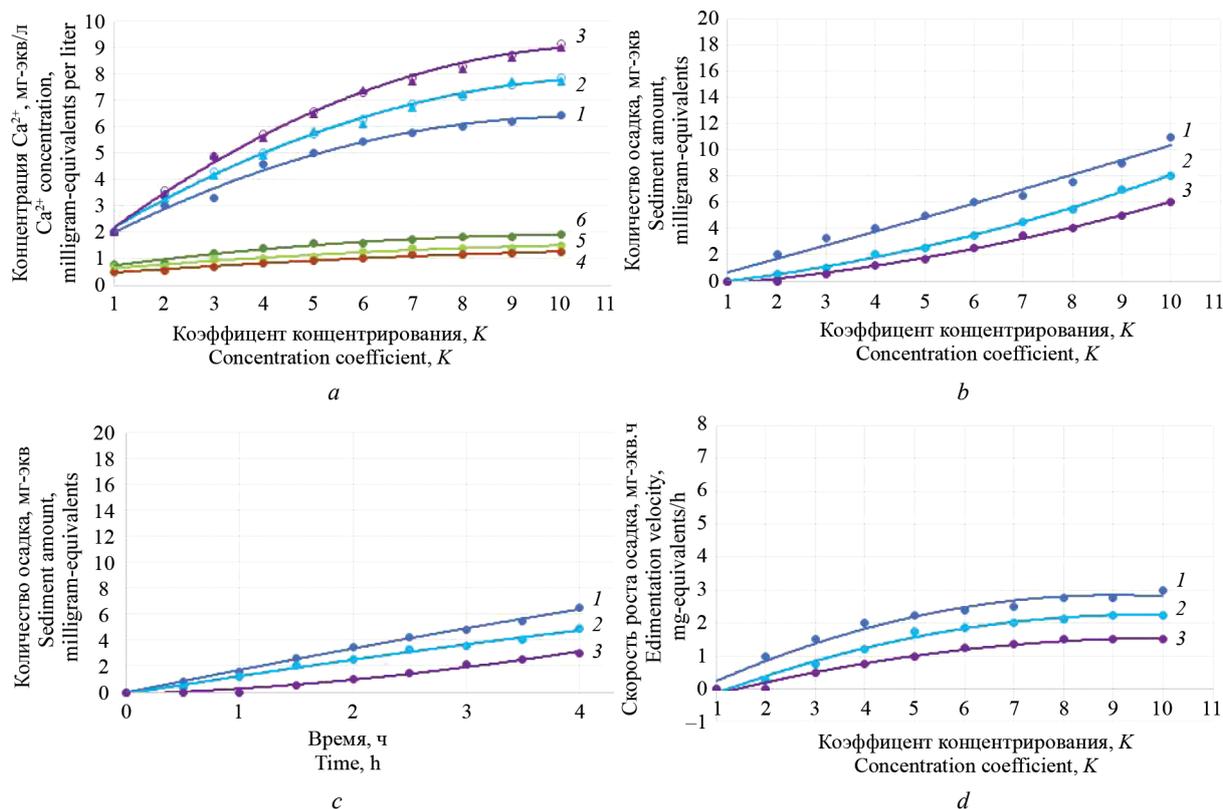


Рис. 5. Сравнение эффективности действия ингибиторов Аминат-К и Nalco-191 при обработке воды с применением низконапорных обратноосмотических мембран: 1 — без добавления ингибиторов; 2 — дозы ингибиторов 1 мг/л; 3 — дозы ингибиторов 5 мг/л; а — зависимость концентраций кальция в исходной воде и пермеате от величины K ; б — зависимость количества образовавшегося осадка M от величины K ; в — зависимость количества образовавшегося осадка M от времени эксперимента T ; д — зависимость скорости роста осадка от величины K

Fig. 5. Compared efficiency of Aminat-K and Nalco-191 inhibitors in the course of water treatment using low pressure reverse osmosis membranes: 1 — no inhibitor added; 2 — inhibitor dose 1 mg/l; 3 — inhibitor dose 5 mg/l; а — ratio of calcium concentration in the feed water and the permeate to the K value; б — ratio of amount of sediment M to the K value; в — ratio of amount of sediment M to experiment time T ; д — ratio of sedimentation velocity to the K value

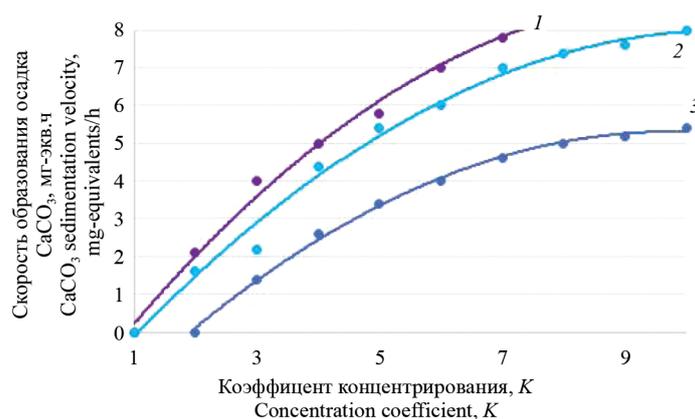


Рис. 6. Сравнение скоростей осадкообразования в нанофильтрационных и обратноосмотических мембранных аппаратах. Зависимости скоростей образования карбоната кальция от величины K : 1 — обратноосмотические мембраны, доза Амината-К — 5 мг/л; 2 — нанофильтрационные мембраны, доза Амината-К — 1 мг/л; 3 — нанофильтрационные мембраны, водопроводная вода без добавления ингибитора

Fig. 6. Comparison of sedimentation velocities inside nanofiltration and reverse osmosis units. Ratios of calcium carbonate sedimentation rates on the K value: 1 — reverse osmosis membranes, if Aminat-K dose is 5 mg/l; 2 — nanofiltration membranes, Aminat-K dose is 1 mg/l; 3 — nanofiltration membranes, no inhibitor added

Кривая 1 — это зависимость скорости осадкообразования в присутствии ингибитора при рекомендуемой дозе 5 мг/л. Величина K изменяется от 1 до 6 (что соответствует величине выхода фильтрата 0,84). Кривая 2 — зависимость скоростей образования осадка при использовании ингибитора Аминат-К (доза 1 мг/л) и мембран 70 NE. При этом величина K изменялась от 1 до 9. И скорость образования при значении $K = 9$ меньше, чем при $K = 4$ в случае использования обратноосмотических мембран. Это дает существенные экономические преимущества — экономию эксплуатационных затрат за счет сокращения расхода электроэнергии, расхода концентрата, затрат на реагенты (ингибитор и моющие растворы).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для использования результатов проведено изучение влияния скорости осадкообразования на формирование эксплуатационных затрат. Сравнение проводилось с технологией получения фильтрата обратного осмоса и смешения его с исходной водой, прошедшей обезжелезивание. Для каждого случая определялись: качество фильтрата при величине выхода фильтрата, количество мембран, количество ингибитора и моющих реагентов. Для двух случаев применения мембранных технологий для очистки подземных вод из водозабора г. Видное (табл. 1 и 2) нами приведены расчеты эксплуатационных затрат (табл. 3 и 4). Для сравнения показан ставший «традиционным» подход, применяемый Мосводоканалом при использовании мембран обратного осмоса, и новый предлагаемый подход, основанный на применении нанофильтрационных мембран и сниженных расходах реагентов (ингибиторов и моющих растворов). При использовании обратноосмотических мембран для снижения величины общей жесткости воды (табл. 1) традиционно применяется обработка половины всей воды методом обратного осмоса с получением воды с величиной жесткости не выше 5,1 мг-экв/л, после чего пермеат установки обратного осмоса смешивается с исходной водой, прошедшей обезжелезивание, в соотношении 1:1 (табл. 1). В табл. 3 представлены расходы воды и затраты на электроэнергию, реагенты и замену мембран при осуществлении разных схем установок производительностью 100 м³ в час по чистой воде. Так, при смешении 50 м³ пермеата и 50 м³ исходной воды общий объем обрабатываемой воды будет выше за счет наличия концентрата, расход которого в зависимости от выбранного соотношения расхода пермеата к расходу исходной воды (выхода фильтрата) будет составлять 125 и 116 м³/ч (для величин выхода фильтрата соответственно 0,66 и 0,75 (табл. 3)). От выбранной вели-

чины выхода фильтрата меняется расход электроэнергии на обработку расходов 75 и 66 м³/ч воды методом обратного осмоса и эксплуатационные затраты на реагенты. Если при уменьшении расхода концентрата расход ингибитора несколько уменьшается (ингибитор дозируется в количестве 5 г в час на один кубический метр исходной воды), то расход моющих реагентов увеличивается с уменьшением расхода концентрата (с ростом величины коэффициента снижения объема K , как видно из рис. 4–6). В табл. 3 представлены годовые затраты на электроэнергию, ингибитор, моющие растворы и замену мембранных элементов, замена которых производится один раз в 5 лет. В случае применения для умягчения воды (табл. 1) нанофильтрационных мембран, очищенная вода с величиной жесткости 2,5–3 мг-экв/л может смешиваться с исходной водой в соотношении 0,25:0,75. При этом расход концентрата установки нанофильтрации составляет 0,05–0,1 от общего количества поступающей на мембранную установку исходной воды. Общее количество воды, поступающей на установку нанофильтрации, будет составлять 80 м³/ч (табл. 3). Нанофильтрационные мембраны работают при давлении 1,0 МПа, что дает существенное снижение величины затрат на электроэнергию по сравнению с мембранами обратного осмоса, эксплуатация которых ведется при давлении 1,6 Бар (табл. 3). Как было показано выше (рис. 3–5), применение нанофильтрационных мембран позволяет значительно снизить интенсивность осадкообразования на мембранах и благодаря этому сократить расходы на ингибитор и моющие растворы. Доза ингибитора в случае использования нанофильтрационных мембран выбрана 1 г/м³ исходной воды, а частота проведения химических промывок снижена в 3 раза по сравнению с применением обратноосмотических мембран. Как видно из табл. 3, затраты на электроэнергию и реагенты значительно превышают затраты на приобретение и замену мембранных элементов. В случае применения нанофильтрационных мембран обработке на мембранной установке подлежит больший объем воды, но затраты на замену мембран при этом оказываются ниже затрат на электроэнергию и реагенты.

Установки нанофильтрации позволяют достичь более высоких значений выхода фильтрата и коэффициента K (рис. 3–5) за счет низкой скорости осадкообразования. Как было показано (рис. 2), для достижения высоких значений величин K используется дополнительная мембранная ступень обработки и сокращения расхода концентрата. Расчеты, представленные в табл. 3 и 4, сделаны с учетом общего количества мембран, используемых в нанофильтрационной мембранной установке.

В случае, если расходы на сброс концентрата в горканизацию учитываются в затратах, уве-

Табл. 3. Определение эксплуатационных затрат установки очистки воды (удаление жесткости и фтора) из скважины г. Видное (табл. 1), производительность 100 м³/ч
Table 3. The cost of operation of a groundwater treatment system (water softening and defluorination) in Vidnoye (Table 1) at 100 m³/h capacity

Показатели Parameters	Обратный осмос / RO		Нанофильтрация / NF	
	Смещение: (пермеат : исходная вода) 1: 1 / Mix: (permeate: feed water 1:1 $Q_p/Q_n = 0,33 (K = 3) / Q_1/Q_{-1} = 0,33 (K = 3)$)	Смещение: (пермеат : исходная вода) 1:2 / Mix: (permeate: feed water 1:2 $Q_p/Q_n = 0,08 (K = 12) / Q_1/Q_{-1} = 0,08 (K = 12)$)	Смещение: (пермеат : исходная вода) 1: 1 / Mix: (permeate : feed water 1:1 $Q_p/Q_n = 0,08 (K = 12) / Q_1/Q_{-1} = 0,08 (K = 12)$)	Смещение: (пермеат : исходная вода) 1: 1 / Mix: (permeate : feed water 1:1 $Q_p/Q_n = 0,08 (K = 12) / Q_1/Q_{-1} = 0,08 (K = 12)$)
Общий расход, м ³ /ч / Total consumption rate, m ³ /h	125	110	105	116
Расход пермеата, м ³ /ч / Permeate consumption rate, m ³ /h	50	33	50	66
Расход, подаваемый на мембранную установку, м ³ /ч Consumption by the membrane system, m ³ /h	75	44	55	72,6
Расход концентрата, м ³ /ч / Concentrate consumption rate, m ³ /h	25	11	5	6,6
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/м ³ Per-unit electric energy consumption rate, kWh/m ³	1,0	1,0	0,7	0,7
Годовые затраты на электроэнергию, руб. Annual electric energy expenses, RR	2 600 000	1 540 000	1 350 000	1 560 000
Количество мембранных модулей типа 8040 Number of membrane units type 8040	50	36	80	90
Годовые затраты на замену мембран, 1 раз в 5 лет, руб. Membrane replacement costs, incurred once in 5 years	350 000	252 000	560 000	630 000
Доза ингибитора Аминат-К, мг/л / Aminat-K inhibitor dose, mg/l	5	5	1	1
Годовое потребление ингибитора, т Annual inhibitor consumption, t	2,63	1,54	0,385	0,462
Годовые затраты на ингибитор, руб. Annual inhibitor-related expenses, RR	524 000	308 000	77 000	92 400
Расходы на одну промывку, кг / Годовые затраты, руб. Consumption per flushing session, kg / Annual costs, RR	400/140 000	288/100 000	320/120 000	360/130 000
Расходы на сброс в канализацию (10 руб./м ³), руб. Cost of discharge into the sewage system (10 RR/m ³)	1 750 000	735 000	350 000	482 000
Итого эксплуатационные затраты, руб. / Total operating expenses, RR	3 750 000	2 835 000	2 457 000	2 784 000

Табл. 4. Определение эксплуатационных затрат установки очистки воды (удаление жесткости и лития) из скважины г. Видное (табл. 2), производительность 100 м³/ч
 Table 4. Operating expenses incurred by the groundwater treatment system (water softening and lithium removal) at a water well in Vidnoye (Table 2), at the capacity of 100 cubic meters per hour

Показатели Parameters	Обратный осмос / RO		Нанофильтрация / NF
	Смешение: (пермеат : исходная вода) 1:1 Mix: (permeate : feed water 1:1)	Смешение: (пермеат : исходная вода) 1:2 Mix: (permeate : feed water 1:2)	
Общий расход, м ³ /ч / Total consumption rate, m ³ /h	185/116	165/154	108
Расход пермеата, м ³ /ч / Permeate consumption rate, m ³ /h	50/50	66 / 66	100
Расход, подаваемый на мембранную установку, м ³ /ч Consumption by the membrane system, m ³ /h	75/66	99 / 88	105
Расход концентрата, м ³ /ч / Concentrate consumption rate, m ³ /h	25/16	33/22	8
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/м ³ Per-unit electric energy consumption rate, kWh/m ³	1,0	1,0	0,5
Годовые затраты на электроэнергию, руб. Annual electric energy expenses, RR	2 600 000/2 310 000	3 500 000/3 150 000	2 120 000
Количество мембранных модулей типа 8040 Number of membrane units type 8040	50	66	120
Годовые затраты на замену мембран, руб. / Membrane replacement costs, RR	350 000	462 000	840 000
Доза ингибитора Аминат-К, мл/м ³ / Aminat-K inhibitor dose, ml/m ³	5	5	1
Годовой расход ингибитора, т / Annual inhibitor consumption, t	2.62	1,97	0,385
Годовые затраты на ингибитор, руб. / Annual inhibitor-related costs, RR	524 000	400 000	77 000
Расходы на промывку, количество на одну промывку, кг Consumption per flushing session, kg	400/140 000	530/290 000	640/240 000
Годовые расходы, руб. Annual costs, RR	1 750 000/1 120 000	2 205 000/1 470 000	560 000
Годовые затраты на сброс концентрата (10 руб./м ³), руб. Cost of discharge into the sewage system (10 RR/m ³)	4 734 000/4 494 000	5 832 000/5 772 000	3 837 000
Эксплуатационные затраты / Operating expenses			

личение количества мембран оказывается экономически обоснованным, так как годовые затраты на сброс концентрата значительно превышают затраты на приобретение и замену дополнительного количества мембранных элементов [16]. Как видно из табл. 3 и 4, затраты на мембраны существенно ниже затрат на электроэнергию, ингибитор и оплату сброса в канализацию, поэтому применение нанофильтрационных мембран в любом из приведенных случаев оказывается экономичнее. Что показывает, что это общее заблуждение многих разработчиков, применяющих метод обратного осмоса на объектах водоканалов.

ВЫВОДЫ

Применение нанофильтрационных мембран позволяет уменьшить интенсивность осадкообразования (предотвращение осадкообразования) и снизить расход концентрата без опасности осадкообразования.

Благодаря использованию нанофильтрационных мембран можно снизить дозу ингибитора и, соответственно, затраты.

Даже при двукратном увеличении количества мембран очевидна экономия за счет концентрата, промывок и электроэнергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Suratt W.B., Adrews D.R., Pujals V.J., Richards S.A. Design considerations for major membrane treatment facility for groundwater // Proceedings of the Conference on Membranes in Drinking and Industrial Water Production. 2000. Vol. 1. Pp. 61–70.
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. 369. Pp. 18–25. DOI: 10.1016/j.desal.2015.04.023
3. Chaussemier M., Pourmohtasham E., Gelus D., Pécoul N., Perrot H., Lédion J. et al. State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling // Desalination. 2015. Vol. 356. Pp. 47–55. DOI: 10.1016/j.desal.2014.10.014
4. Turek M., Mitko K., Dydo P., Laskovska E., Jakobc-Kolon A. Prospects for high water recovery membrane desalination // Desalination. 2017. Vol. 401. Pp. 180–189. DOI: 10.1016/j.desal.2016.07.047
5. 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
6. 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
7. 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
8. 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
9. Pramanik B.K., Gao Y., Fan L., Roddick F.A., Liu Z. Antiscalcing effect of polyaspartic acid and its derivative for RO membranes used for saline wastewater and brackish water desalination // Desalination. 2017. Vol. 404. Pp. 224–229. DOI: 10.1016/j.desal.2016.11.019
10. 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
11. 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
12. 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
13. 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
14. Shahid M.K., Pyo M., Choi Y.-G. The operation of reverse osmosis system with CO₂ as a scale inhibitor: A study on operational behavior and membrane morphology // Desalination. 2018. Vol. 426. Pp. 11–20. DOI: 10.1016/j.desal.2017.10.020
15. 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

16. 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. 586–892. DOI: 10.1002/cnma.201800660

Поступила в редакцию 13 ноября 2020 г.

Принята в доработанном виде 20 ноября 2020 г.

Одобрена для публикации 23 ноября 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Владимир Алексеевич Головесов — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 905028; golovesov.vova@mail.ru;

Галина Яковлевна Рудакова — ведущий специалист; Научный центр «Малотоннажная химия»; 107564, г. Москва, ул. Краснобогатырская, д. 42, стр. 1; РИНЦ ID: 545557; info@nc-mtc.ru;

Алексей Германович Первов — доктор технических наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 168126; ale-pervov@yandex.ru;

Дмитрий Владимирович Спицов — кандидат технических наук, исполняющий обязанности директора института Инженерно-экологического строительства и механизации; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129997, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 531559; spitsovdv@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Suratt W.B., Adrews D.R., Pujals V.J., Richards S.A. Design considerations for major membrane treatment facility for groundwater. *Proceedings of the Conference on Membranes in Drinking and Industrial Water Production*. 2000; 1:61-70.
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; 369:18-25. DOI: 10.1016/j.desal.2015.04.023
3. Chaussemier M., Pourmohtasham E., Gelus D., Pécoul N., Perrot H., Lédion J. et al. State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling. *Desalination*. 2015; 356:47-55. DOI: 10.1016/j.desal.2014.10.014
4. 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
5. 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):722733. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.6.722-733
6. 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
7. 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
8. 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
9. Pramanik B.K., Gao Y., Fan L., Roddick F.A., Liu Z. Antiscalant effect of polyaspartic acid and its derivative for RO membranes used for saline wastewater and brackish water desalination. *Desalination*. 2017; 404:224-229. DOI: 10.1016/j.desal.2016.11.019
10. 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
11. 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
12. 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
13. 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
14. Shahid M.K., Pyo M., Choi Y.-G. The operation of reverse osmosis system with CO₂ as a scale inhibitor: A study on operational behavior and membrane morphology. *Desalination*. 2018; 426:11-20. DOI: 10.1016/j.desal.2017.10.020

15. 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

16. 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):586-892. DOI: 10.1002/cnma.201800660

Received November 13, 2020.

Adopted in revised form on November 20, 2020.

Approved for publication on November 23, 2020.

B I O N O T E S: **Vladimir A. Golovesov** — postgraduate student of 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: 905028; golovesov.vova@mail.ru;

Galina Ya. Rudakova — leading specialist; **Scientific Center “Low-tonnage chemistry”**; build. 1, 42 Krasnobogatyrskaya st., Moscow, 107258, Russian Federation; ID RISC: 545557; info@nc-mtc.ru;

Alexei G. Pervov — Doctor of Technical Sciences, Professor of 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; ale-pervov@yandex.ru;

Dmitriy V. Spitsov — Candidate of Technical Sciences, 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; spitsovdv@mgsu.ru.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 69:004.9

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1570-1583

Применение XML-схем при формировании структуры информационной модели объектов капитального строительства

С.А. Волков¹, Т.В. Хрипко²

¹ Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» «Отраслевой центр капитального строительства» (Госкорпорация «Росатом» «ОЦКС»); г. Москва, Россия;

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Информационное моделирование зданий (BIM) — это многообещающий подход, который поддерживает управление и обмен семантически богатыми 3D-моделями между дисциплинами проекта. В последнее время BIM получил широкое распространение в индустрии АЕС, он повышает эффективность и качество процесса, способствуя раннему обмену 3D-моделями зданий. На разных этапах жизненного цикла (ЖЦ) информационная модель (ИМ) здания постепенно дорабатывается от грубого концептуального проекта до подробных отдельных компонентов. Требуется разработать механизмы машинной проверки (верификации) данных, передаваемых в виде ИМ объектов капитального строительства (ОКС) или определенных частей ИМ между различными системами (например, от заказчика экспертизе, от исполнителя в государственную информационную систему обеспечения государственной деятельности (ГИСОГД) или другие государственные информационные системы).

Материалы и методы. В качестве обоснования выбора языка описания машиночитаемых документов проведен анализ различных вариантов использования XML-схем, в том числе с применением инструмента Google Trends. Рассмотрены реализованные в Российской Федерации информационные системы. В большинстве из них для описания XSD-схем используется язык W3C XML Schema.

Результаты. Приведен сводный перечень XML-схем, необходимых и достаточных для сопровождения этапов ЖЦ ОКС, в части взаимодействия с ГИСОГД. Для обеспечения процессов взаимодействия участников ЖЦ с государственными информационными системами необходимо утвердить на федеральном уровне перечень XML-схем. В работе представлены матрицы сценариев применения XML-схем в координатах: участники, этапы ЖЦ.

Выводы. С учетом дальнейшего развития методических подходов и изменений нормативно-технических актов возможно дополнение XML-схем для различных этапов ЖЦ ОКС с их обязательной верификацией и обоснованием подходов и необходимости внесения данного дополнения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: XML-схемы, информационная модель, информационные системы, информационное моделирование зданий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Волков С.А., Хрипко Т.В. Применение XML-схем при формировании структуры информационной модели объектов капитального строительства // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 11. С. 1570–1583. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1570-1583

Using XML schemas to structure information models of capital construction facilities

Sergey A. Volkov¹, Tatiana V. Khripko²

¹ Centre of Expertise for Major Construction Projects, Private Enterprise of the Rosatom State Atomic Energy Corporation (CEMCP ROSATOM); Moscow, Russian Federation;

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

ABSTRACT

Introduction. Building Information Modeling (BIM) is an auspicious approach that supports management and exchange of semantically rich 3D models across design disciplines. Recently, BIM has gained widespread acceptance in the AEC industry, and it improves the efficiency and quality of the process by facilitating the early exchange of 3D building models. At different stages of the life cycle, a building information model is gradually refined from rough conceptual design to detailed individual components. The task is to develop mechanisms for machine verification (authentication) of data transmitted to/from different systems (for example, from a customer to an expert evaluation authority, from a contractor to the urban plan-

ning management information system or any other state information system) in the form of an information model of capital construction facilities or certain components of an information model.

Materials and methods. To substantiate the choice of the language employed to describe machine-readable documents, various use cases of XML schemas were analyzed, including the use of the Google Trends tool. Information systems, implemented in the Russian Federation, were also considered. Most of them use the W3C XML Schema language to describe XSD schemas.

Results. A consolidated list of XML schemas, necessary and sufficient to maintain stages of the life cycle of a capital construction facility in terms of interaction with the Urban Planning Management Information System is presented. To ensure interaction between the life cycle participants and state information systems, it is necessary to have the list of XML schemas approved at the federal level. The paper presents matrixes of scenarios for the application of XML schemas in the following coordinates: participants, life cycle stages.

Conclusions. XML schemas can be supplemented in respect of various stages of a life cycle of a capital construction facility to be verified with due regard for further methodological approaches and changes in regulatory and technical acts; new approaches and the need for this supplementation must be substantiated.

KEYWORDS: XML schemas, information model, information systems, building information modeling

FOR CITATION: Volkov S.A., Khripko T.V. Using XML schemas to structure information models of capital construction facilities. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(11):1570-1583. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1570-1583 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Информационное моделирование зданий (BIM) — это многообещающий подход, который поддерживает управление и обмен семантически богатыми 3D-моделями между дисциплинами проекта. В последнее время BIM получил широкое распространение в индустрии АЕС, он повышает эффективность и качество процесса, способствуя раннему обмену 3D-моделями зданий. На разных этапах строительного проекта модель здания постепенно дорабатывается от грубого концептуального проекта до подробных отдельных компонентов [1–6].

На ранних этапах проектирования информация о модели BIM не является точной, поскольку она не подвергается множественным изменениям на последующих этапах проектирования. В настоящее время методы планирования на основе моделей не способны управлять несколькими уровнями развития, включая описание их геометрической и семантической неопределенности информации. Ни формального определения уровня развития компонента здания, ни четкого описания нечеткости информации не существует. Напротив, модель BIM выглядит точной и определенной, что может привести к ложным предположениям и оценкам модели, как в случае расчетов энергоэффективности или структурного анализа, которые влияют на проектные решения, принимаемые на всех этапах проектирования [7–10].

Проектирование и строительство здания представляют собой совместный процесс между несколькими дисциплинами, каждый эксперт, например архитектор и инженер-строитель, использует разные инструменты разработки и требует пользовательских спецификаций для поддержки определенного типа моделирования и анализа. С ростом специализации и неоднородности проектов строительная отрасль нуждается в высоком уровне взаимодействия. 15 сентября 2020 г. было подписано Постановление Правительства Российской Федера-

ции от № 1431, регламентирующее правила формирования и ведения информационной модели (ИМ) объекта капитального строительства, а также состав включаемых в нее данных и требования к форматам электронных документов. Обязательство по ведению и формированию ИМ возложено на застройщика или технического заказчика. Однако существует проблема отсутствия механизмов машинной проверки (верификации) данных, передаваемых в виде ИМ объекта капитального строительства (ОКС) или определенных частей ИМ между различными системами (например, от заказчика экспертизе, от исполнителя в государственную информационную систему обеспечения государственной деятельности (ГИСОГД) или другие государственные информационные системы), также необходимо разработать методические основы формирования структуры ИМ на разных этапах жизненного цикла (ЖЦ) для разных видов ОКС [11–15].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве обоснования выбора языка описания машиночитаемых документов (МЧД) проанализировано использование различных вариантов XML-схем, в том числе и с инструментом Google Trends. На основе инструмента Google Trends (рис. 1) можно сделать вывод, что в настоящее время имеет смысл использовать XSD-схему как наиболее распространенную, однако в перспективе целесообразно рассмотреть возможность перехода на более компактные и современные схемы разметки XML-документов.

Проведен анализ российских и зарубежных правил, норм, практик, научных разработок и методик в части упорядочивания информационных данных об ОКС с применением XML-схем или аналогичных решений. 19 октября 2012 г. вышел Приказ № 327 Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации «Об утверждении требований к формату предоставления заключений

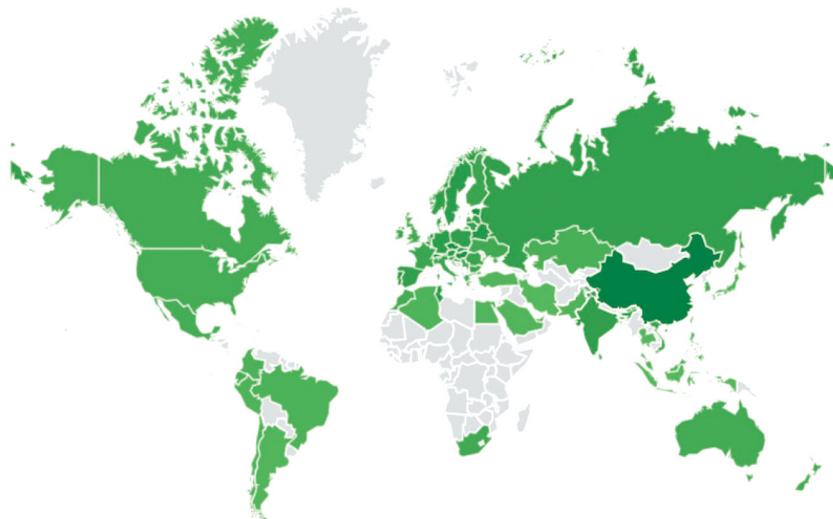


Рис. 1. Распределение запросов по теме XSD по регионам (источник: Google Trends)

Fig. 1. Distribution of XSD topic queries by the region (source: Google Trends)

о привлечении и об использовании иностранных работников в форме электронных документов». В Приказе закреплены XSD-схемы, обеспечивающие информационное взаимодействие. Использован язык описания W3C XML Schema. 17 декабря 2012 г. подписан Приказ № 599 Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации «Об утверждении требований к формату предоставления сведений о нахождении гражданина на регистрационном учете в государственном учреждении службы занятости населения в целях поиска подходящей работы и регистрационном учете безработных граждан, о назначенных безработному гражданину социальных выплатах, периодах участия в оплачиваемых общественных работах, переезде по направлению органов службы занятости в другую местность для трудоустройства и руководства пользователем электронного сервиса системы межведомственного электронного взаимодействия». В Приказе закреплены XSD-схемы, обеспечиваю-

щие информационное взаимодействие. Использован язык описания W3C XML Schema. 24 января 2014 г. вышло Распоряжение № 136р ОАО «Российские железные дороги» «О соглашении об обмене электронными документами», предусматривающее XML как формат обмена электронными документами. В подавляющем большинстве из рассмотренных мировых информационных систем и во всех рассмотренных информационных системах, реализованных в Российской Федерации, для описания XSD-схем используется язык W3C XML Schema.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В таблице приведен сводный перечень XML-схем, необходимых и достаточных для сопровождения этапов ЖЦ ОКС в части взаимодействия с ГИСОГД.

Далее подробнее рассмотрим перечисленные XML-схемы.

Перечень XML-схем, обеспечивающих сопровождение ЖЦ ОКС

List of XML schemas that support the life cycle of a capital construction facility

Наименование этапа ЖЦ Description of LC stage	Уровень проработки цифровой ИМ Elaboration level of digital IM	XML-схемы XML schemas
На всех этапах In all stages	—	Корневая XML-схема Root XML schema
Инженерные изыскания Engineering survey	Модель инженерных изысканий Engineering survey model	XML-схема ИМ инженерных изысканий XML schema of IM engineering survey
		XML-схема заключения экспертизы результатов инженерных изысканий XML schema of the final appraisal of engineering survey results

Окончание табл. / End of Table

Наименование этапа ЖЦ Description of LC stage	Уровень проработки цифровой ИМ Elaboration level of digital IM	XML-схемы XML schemas
Архитектурно-строительное проектирование (проектирование) Architectural and civil engineering design (design work)	Проектная модель Design model	XML-схема проектной модели для зданий и сооружений XML schema of the design model for buildings and facilities
		XML-схема проектной модели для линейных объектов XML schema of the design model for linear facilities
		Оptionальные XML-схемы проектных технологических моделей Optional XML schemas of design process models
		XML-схема заключения экспертизы проекта XML schema of the final appraisal of the project
Строительство, реконструкция, капитальный ремонт Construction, reconstruction, general overhaul	Строительная модель Construction model	XML-схема строительной модели для зданий и сооружений (строительство и реконструкция) XML schema of a construction model for buildings and facilities (construction and reconstruction)
		XML-схема строительной модели для линейных объектов (строительство и реконструкция) XML schema of a construction model for linear facilities (construction and reconstruction)
		XML-схема строительной модели для зданий и сооружений (капитальный ремонт) XML schema of a construction model for buildings and facilities (general overhaul).
		XML-схема строительной модели для линейных объектов (капитальный ремонт) XML schema of a construction model for linear facilities (general overhaul)
		Оptionальные XML-схемы строительных технологических моделей Optional XML schemas of construction process models
	Исполнительная модель Executive model	XML-схема исполнительной модели для зданий и сооружений (строительство и реконструкция) XML schema of an executive model for buildings and facilities (construction and reconstruction)
		XML-схема исполнительной модели для линейных объектов (строительство и реконструкция) XML schema of an executive model for linear facilities (construction and reconstruction)
		XML-схема исполнительной модели для зданий и сооружений (капитальный ремонт) XML schema of an executive model for buildings and facilities (general overhaul).
		XML-схема исполнительной модели для линейных объектов (капитальный ремонт) XML schema of an executive model for linear facilities (general overhaul)
		Оptionальные XML-схемы исполнительных технологических моделей Optional XML schemas of executive process models
Эксплуатация Operation	Эксплуатационная модель Operation model	XML-схема эксплуатационной модели для зданий и сооружений XML schema of the operation model for buildings and facilities
		XML-схема эксплуатационной модели для линейных объектов XML schema of the operation model for linear facilities
		Оptionальные XML-схемы эксплуатационных технологических моделей Optional XML schemas of operation process models
Снос и утилизация (ликвидация) Demolition and disposal (discarding)	Модель сноса и утилизации Demolition and disposal model	XML-схема модели сноса и утилизации для зданий и сооружений XML schema of the demolition and disposal model for buildings and facilities
		XML-схема модели сноса и утилизации для линейных объектов XML schema of the demolition and disposal model for linear facilities
		Оptionальные XML-схемы технологических моделей сноса и утилизации Optional XML schemas of demolition and disposal process models

Корневая XML-схема, определяющая структуру и состав ИМ, разработана в соответствии с ГОСТ Р 10.0.02-2019/ИСО 16739-1:2018 «Система стандартов информационного моделирования зданий и сооружений. Отраслевые базовые классы (IFC) для обмена и управления данными об объектах строительства. Часть 1. Схема данных». Следует отметить, что ИМ передаются в формате IFC.

XML-схема ИМ инженерных изысканий предназначена для передачи ИМ инженерных изысканий в информационную систему. ИМ инженерных изысканий формируется на этапе инженерных изысканий в целях формирования совокупных исходных данных для планирования будущего ОКС. Позволяет производить комплексный анализ территории, окружающей среды и подземного пространства с целью определения технологии строительства и возможных ограничений для строительства. Модель формируется на основании данных выполняемых инженерных изысканий [16].

XML-схема заключения экспертизы результатов инженерных изысканий предназначена для передачи в информационную систему заключения экспертизы результатов инженерных изысканий по итогам рассмотрения органом экспертизы результатов инженерных изысканий.

XML-схема проектной модели рассчитана для передачи проектной модели в информационную систему. Проектная модель формируется на этапе архитектурно-строительного проектирования в целях представления и передачи для экспертизы проектных решений, включая сметы на строительство ОКС [17]. Модель формируется с учетом данных модели инженерных изысканий. В качестве примера приведем состав данных XML-схемы проектной модели:

- договор на выполнение архитектурно-строительного проектирования, включая задание на проектирование;
- задание на проведение работ по сохранению объектов культурного наследия федерального значения (в случаях, предусмотренных законодательством Российской Федерации);
- договор на разработку специальных технических условий (в случаях, предусмотренных законодательством Российской Федерации);
- специальные технические условия (в случаях, предусмотренных законодательством Российской Федерации);
- технические условия подключения ОКС к сетям инженерно-технического обеспечения;
- положительное сводное заключение о проведении публичного технологического аудита крупного инвестиционного проекта с государственным участием (в случаях, предусмотренных законодательством Российской Федерации);
- заключение государственной экологической экспертизы (в случаях, предусмотренных законодательством Российской Федерации);

- заключение государственной историко-культурной экспертизы (в случаях, предусмотренных законодательством Российской Федерации);

- заключение экспертизы промышленной безопасности (в случаях, предусмотренных законодательством Российской Федерации);

- акты (решения) собственника здания (сооружения, строения) о выведении из эксплуатации и ликвидации ОКС (в случае необходимости сноса (демонтажа));

- решение органа местного самоуправления о признании жилого дома аварийным и подлежащим сносу (при необходимости сноса жилого дома);

- пояснительная записка;

- расчетная схема ОКС;

- инженерная цифровая модель местности (ИЦММ) соответствующего уровня проработки;

- цифровая информационная модель объекта капитального строительства (ЦИМ ОКС) соответствующего уровня проработки.

Оptionальные XML-схемы проектных технологических моделей предназначены для передачи проектных технологических моделей в информационную систему [18]. Проектная технологическая модель (или модели) формируется в составе проектной модели на этапе архитектурно-строительного проектирования и включает в себя описание технологических решений объекта проектирования.

XML-схема строительной модели (строительство и реконструкция) предназначена для передачи строительной модели в информационную систему. Строительная модель (строительство и реконструкция) формируется на этапе строительства или реконструкции как форма реализации рабочей документации и детального планирования строительного производства [19]. Модель формируется на основании проектной модели, имеющей положительное экспертное заключение.

XML-схема строительной модели (капитальный ремонт) предназначена для передачи строительной модели в информационную систему. Строительная модель (капитальный ремонт) формируется на этапе капитального ремонта как форма реализации рабочей документации и детального планирования строительного производства. Модель формируется на основании проектной модели, имеющей положительное экспертное заключение [20].

Оptionальные XML-схемы строительных технологических моделей предназначены для передачи строительных технологических моделей в информационную систему. Строительная технологическая модель (или модели) формируется в составе строительной модели на этапе строительства или реконструкции, или капитального ремонта и включает в себя описание технологических решений объекта проектирования.

XML-схема исполнительной модели предназначена для передачи исполнительной модели в ин-

формационную систему. Исполнительная модель формируется на этапе строительства или реконструкции в целях формирования полной информации об объекте по результатам строительства (или реконструкции), необходимой в качестве исходных данных для формирования эксплуатационной модели и последующего планирования реконструкции, капитального ремонта, сноса и утилизации [21]. Модель содержит данные о соответствии результатов производства строительных работ проектной модели. Модель формируется на основе проектной модели и строительной модели.

XML-схема исполнительной модели предназначена для передачи исполнительной модели в информационную систему. Исполнительная модель (капитальный ремонт) формируется на этапе строительства или реконструкции в целях формирования полной информации об объекте по результатам капитального ремонта, необходимой в качестве исходных данных для формирования эксплуатационной модели и последующего планирования реконструкции, капитального ремонта, сноса и утилизации. Модель содержит данные о соответствии результатов производства строительных работ проектной модели. Модель формируется на основе проектной модели и строительной модели.

Опциональные XML-схемы исполнительных технологических моделей предназначены для передачи исполнительных технологических моделей в информационную систему. Исполнительная технологическая модель (или модели) формируется в составе исполнительной модели на этапе строительства или реконструкции, или капитального ремонта и включает в себя описание технологических решений объекта проектирования [22].

XML-схема эксплуатационной модели предназначена для передачи эксплуатационной модели в информационную систему. Эксплуатационная модель формируется на этапе эксплуатации в целях обеспечения процессов формирования и принятия решений по планированию технологии эксплуатации, планированию регламентированного обслуживания и управлению изменениями ОКС на этапе эксплуатации. Одновременно с этим эксплуатационная модель совместно с исполнительной моделью служит основой для формирования исходных данных и информационного моделирования при реконструкции, капитальном ремонте, последующем сносе и утилизации ОКС. Модель формируется на основе исполнительной модели. При отсутствии исполнительной модели, эксплуатационная модель формируется по результатам обследования ОКС [23].

Опциональные XML-схемы эксплуатационных технологических моделей предназначены для передачи эксплуатационных технологических моделей в информационную систему. Эксплуатационная технологическая модель (или модели) формируется в составе эксплуатационной модели на этапе экс-

плуатации и включает в себя описание технологических решений объекта проектирования [24–26].

XML-схема модели сноса и утилизации предназначена для передачи модели сноса и утилизации в информационную систему. Модель сноса и утилизации формируется на этапе сноса и утилизации в целях планирования строительного производства в части демонтажных работ и рекультивации территории. Модель формируется на основе эксплуатационной модели [27]. При отсутствии эксплуатационной модели модель сноса и утилизации формируется по результатам обследования ОКС.

Опциональные XML-схемы технологических моделей сноса и утилизации предназначены для передачи технологических моделей сноса и утилизации в информационную систему. Технологическая модель (или модели) сноса и утилизации формируется в составе модели сноса и утилизации на этапе сноса и утилизации и включает в себя описание технологических решений объекта проектирования [28].

Для обеспечения процессов взаимодействия участников ЖЦ с государственными информационными системами необходимо утвердить на федеральном уровне перечень XML-схем [29–30]. Определим матрицы сценариев применения XML-схем в координатах: участники, этапы ЖЦ.

Рассматриваемые этапы ЖЦ:

- инженерные изыскания;
- архитектурно-строительное проектирование (проектирование — для производственных объектов);
- строительство, реконструкция и капитальный ремонт;
- эксплуатация;
- снос и утилизация (ликвидация — для производственных объектов).

Основными участниками этапа ЖЦ «Инженерные изыскания» являются:

- застройщик, технический заказчик, лицо, ответственное за эксплуатацию ОКС (далее — заказчик);
- индивидуальный предприниматель или юридическое лицо, выполняющие работы по заключенному с застройщиком, техническим заказчиком, лицом, ответственным за эксплуатацию ОКС, договору о выполнении инженерных изысканий (далее — исполнитель);
- уполномоченные на проведение государственной экспертизы органы исполнительной власти, подведомственные указанным органам государственные (бюджетные или автономные) учреждения, государственное (бюджетное или автономное) учреждение, подведомственное Министерству строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (далее — организации по проведению государственной экспертизы).

Схема сценария применения XML-схем для этапа «Инженерные изыскания» представлена на рис. 2.

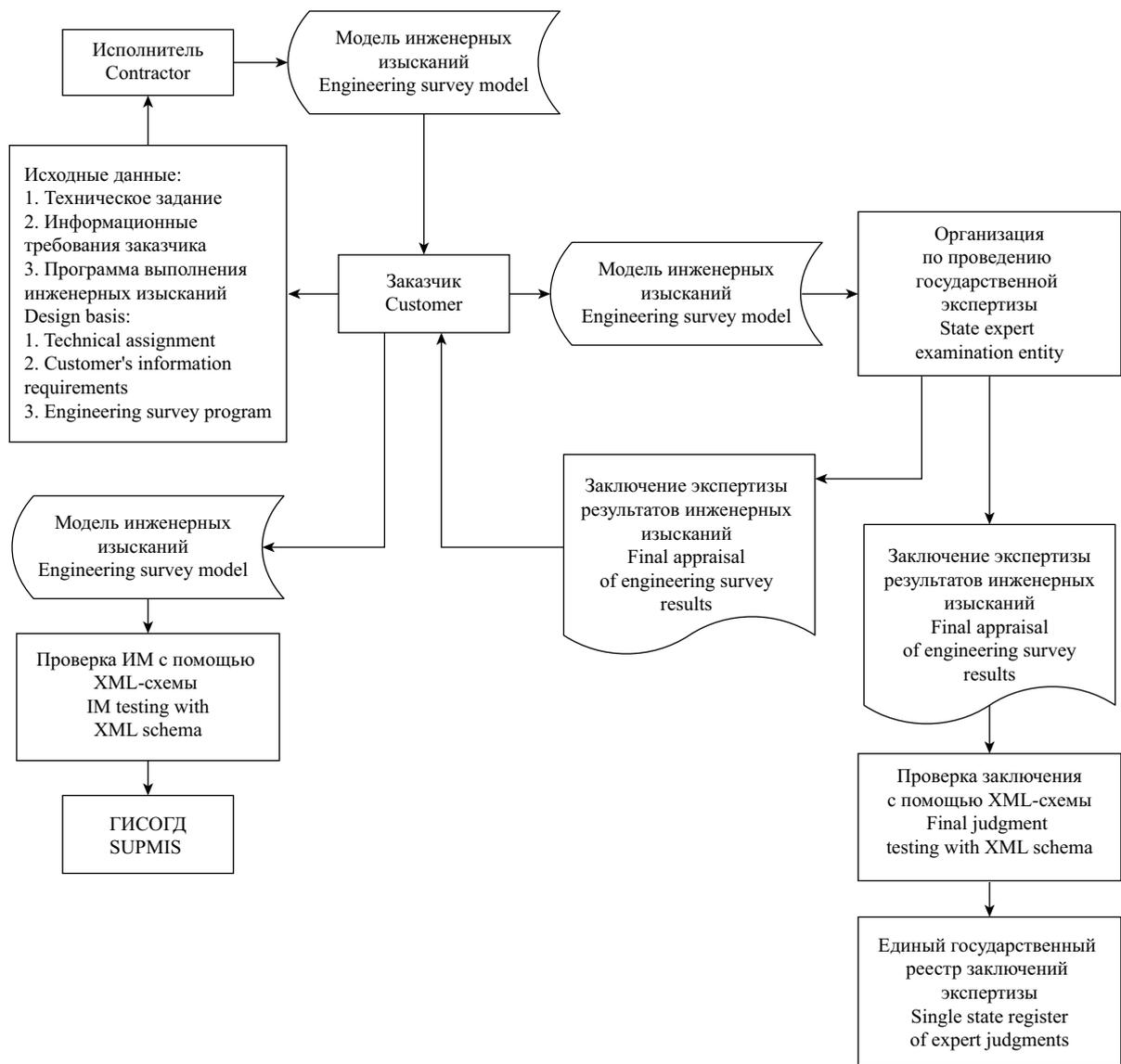


Рис. 2. Схема сценария применения XML-схем для этапа «Инженерные изыскания»

Fig. 2. The flow chart of XML schemas for the “Engineering survey” stage

Note: SUPMIS — State urban planning management information system

Основными участниками этапа ЖЦ «Архитектурно-строительное проектирование» являются:

- застройщик, технический заказчик, лицо, ответственное за эксплуатацию ОКС (далее — заказчик);
- индивидуальный предприниматель или юридическое лицо, выполняющие работы по заключенному с застройщиком, техническим заказчиком, лицом, ответственным за эксплуатацию ОКС, договору о подготовке проектной документации в форме ИМ ОКС, внесении изменений в такую документацию (далее — исполнитель);
- уполномоченные на проведение государственной экспертизы органы исполнительной власти, подведомственные указанным органам государственные (бюджетные или автономные) учреждения, государственное (бюджетное или автономное) учреждение,

подведомственное Министерству строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (далее — организации по проведению государственной экспертизы).

Схема сценария применения XML-схем для этапа «Архитектурно-строительное проектирование» представлена на рис. 3.

Основные участники этапа ЖЦ «Строительство, реконструкция, капитальный ремонт»:

- застройщик, технический заказчик, лицо, ответственное за эксплуатацию ОКС (далее — заказчик);
- индивидуальный предприниматель или юридическое лицо, выполняющие работы по заключенному с застройщиком, техническим заказчиком, лицом, ответственным за эксплуатацию ОКС, догово-

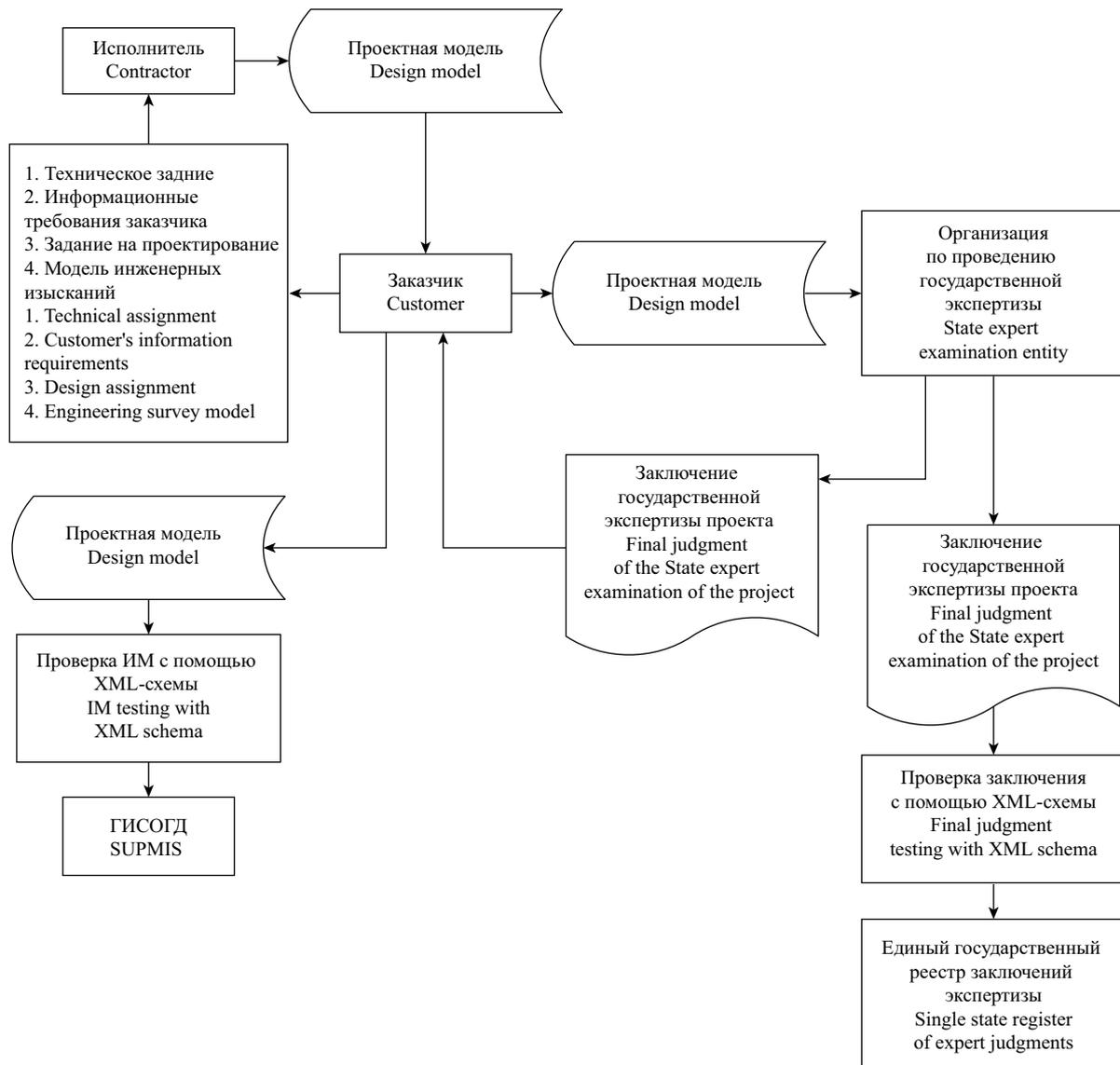


Рис. 3. Схема сценария применения XML-схем для этапа «Архитектурно-строительное проектирование»

Fig. 3. The flow chart of XML schemas for the “Architectural and civil engineering design” stage

вору строительства, реконструкции, капитального ремонта ОКС (далее — исполнитель);

- индивидуальный предприниматель или юридическое лицо, выполняющие работы по заключенному с застройщиком, техническим заказчиком, лицом, ответственным за эксплуатацию ОКС, договору строительного контроля (далее — исполнитель (строительный контроль));

- индивидуальный предприниматель или юридическое лицо, выполняющие работы по заключенному с застройщиком, техническим заказчиком, лицом, ответственным за эксплуатацию ОКС, договору авторского надзора (далее — исполнитель (авторский надзор));

- орган государственного строительного надзора.

Схема сценария применения XML-схем для этапа «Строительство, реконструкция, капитальный ремонт» представлена на рис. 4.

Основные участники этапа ЖЦ «Эксплуатация»:

- застройщик, технический заказчик, лицо, ответственное за эксплуатацию ОКС (далее — эксплуатирующая организация);

- индивидуальный предприниматель или юридическое лицо, выполняющие работы по заключенному с застройщиком, техническим заказчиком, лицом, ответственным за эксплуатацию ОКС, договору на осуществление текущего ремонта ОКС, иным договорам, предусматривающим формирование и ведение ИМ, посредством включения в такую модель взаимосвязанных сведений, документов, материалов или их изменения, в соответствии с составом сведений, документов, материалов,

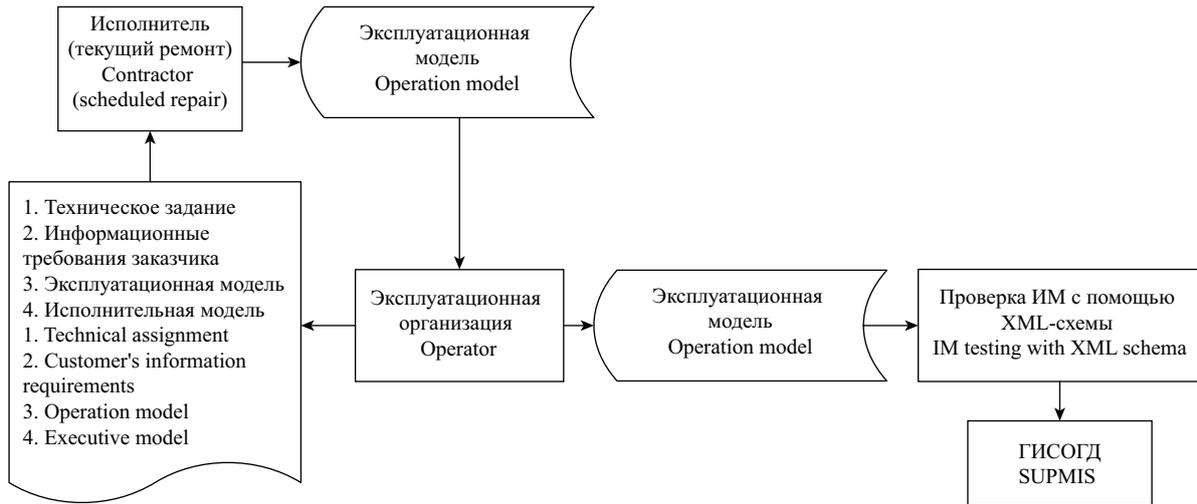


Рис. 5. Схема сценария применения XML-схем для этапа «Эксплуатация»

Fig. 5. The flow chart of XML schemas for the “Operation” stage

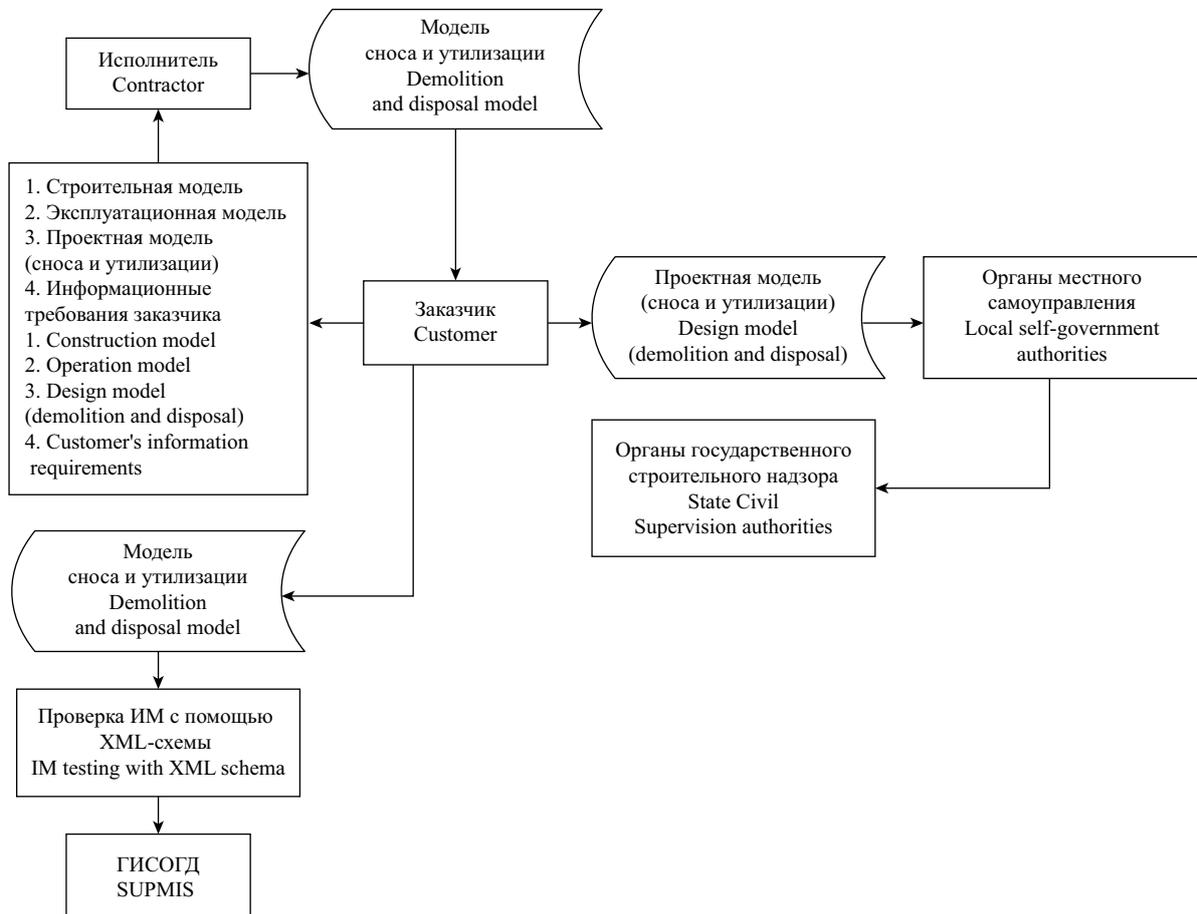


Рис. 6. Схема сценария применения XML-схем для этапа «Снос и утилизация»

Fig. 6. The flow chart of XML schemas for the “Demolition and disposal” stage

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из перечисленных позиций можно сделать вывод о целесообразности применения XML-схем, как инструмента организации обмена электрон-

ными документами на всех этапах ЖЦ ОКС. В настоящее время, учитывая надежность применения, рационально использовать в качестве языка описания XML-схем W3C XML Schema, что также позволит обеспечить совместимость с другими

информационными системам. При этом необходимо иметь в виду потенциал оптимизации системы передачи и хранения электронных документов при применении более современных языков описания XML-схем (таких как Schematron) и предусмотреть в перспективе двух-трех лет возможность проведения дополнительных исследований с возможными

экспериментальными участками перехода на новые языки описания XML-схем.

С учетом дальнейшего развития методических подходов и изменений нормативно-технических актов возможно дополнение XML-схем для различных этапов ЖЦ ОКСа с их обязательной верификацией и обоснованием подходов и необходимости внесения данного дополнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков А.А., Чельшиков П.Д., Седов А.В., Красновский Б.М., Пазюк Ю.В., Лысенко Д.А. Перспектива разработки и внедрения моделей и методик перспективного ресурсного моделирования отраслевых объектов // Естественные и технические науки. 2014. № 9–10 (77). С. 254–255.
2. Чельшиков П.Д. Аспекты автоматизированного проектирования киберфизических строительных систем // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 9. С. 21–27.
3. Чельшиков П.Д. Киберфизическая интеграция строительных систем // Естественные и технические науки. 2018. № 6 (120). С. 198–200.
4. Volkov A., Sedov A., Chelyshkov P., Pavlov A., Kievskiy L. Promising energy and ecological modeling in computer-aided design // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. Issue 3. Pp. 1645–1648.
5. Katzenbach A., Handschuh S., Vettermann S. JT format (ISO 14306) and AP 242 (ISO 10303): The step to the next generation collaborative product creation. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. Pp. 41–52. DOI: 10.1007/978-3-642-41329-2_6
6. Volkov A., Sukneva L. Programming applications of computer aided design and layout of the complex solar panels // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 411–414. Pp. 1840–1843. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.411-414.1840
7. Volkov A., Muminova S. Devaluation modelling for residential buildings // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 860–863. Pp. 2864–2867. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.860-863.2864
8. Volkov A., Chulkov V., Kazaryan R., Sinenko S. Acting adaptation and human parity in the triad “Man – Knowledge – Methods” // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 584–586. Pp. 2681–2684. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.584-586.2681
9. Volkov A.A., Vasilkin A. Optimal design of the steel structure by the sequence of partial optimization // Procedia Engineering. 2016. Vol. 153. Pp. 850–855. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.176
10. Volkov A., Chulkov V., Kazaryan R., Gazaryan R. Cycle reorganization as model of dynamics change and development norm in every living and artificial beings // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 584–586. Pp. 2685–2688. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.584-586.2685
11. Volkov A.A., Roytman V.M., Shilova L.A. Model of stability of life support systems in emergency situations // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. Issue 3. Pp. 1666–1669.
12. Volkov A., Sedov A., Chelyshkov P., Kulikova E. Modeling the thermal comfort of internal building spaces in hospital // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 584–586. Pp. 753–756. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.584-586.753
13. Volkov A., Chelyshkov P., Grossman Y., Khromenkova A. BIM cost analysis of transport infrastructure projects // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 90. P. 012203. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012203
14. Volkov A., Sedov A., Chelyshkov P. Modelling the thermal comfort of internal building spaces in social buildings // Procedia Engineering. 2014. Vol. 91. Pp. 362–367. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.075
15. Volkov A., Sedov A., Chelyshkov P., Kulikova E. Modeling the thermal comfort of internal building spaces in kindergarten // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 584–586. Pp. 757–760. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.584-586.757
16. Lysenko D., Chelyshkov P. The method of optimization of energy-efficient engineering solutions by varying criteria in CAD // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 022027. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022027
17. Lapko A.V., Lapko V.A. Selection of the optimal number of intervals sampling the region of values of a two-dimensional random variable // Measurement Techniques. 2016. Vol. 59. Issue 2. Pp. 122–126. DOI: 10.1007/s11018-016-0928-y
18. Aleksandrova T., Gromakov E., Chugunov R., Syramkin V. Virtual analysis of technical equipment operational states variability // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 79. P. 01006. DOI: 10.1051/mateconf/20167901006
19. Gromyschova S.S., Astashkov N.P., Olentsevich V.A., Lobanov O.V. Safety level assessment of complexly structured transport systems with the purpose of increasing the level of their competitiveness in the mar-

ket of transport services // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2019. Vol. 2 (62). Pp. 250–259. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).250-259

20. Lutin V.I., Khripunov Y.V., Desyatirikova E.N., Myshovskaya L.P., Lapshina K.N. Automatic quality control of processes in the online educational environment // 2019 International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS). 2019. Pp. 634–638. DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928311

21. Svyd I., Obod I., Maltsev O., Shtykh I., Zavalodko G. Model and method for detecting request signals in identification friend or foe systems // 2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM). 2019. DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779322

22. Pyt'ev Y.P. Mathematical modeling of randomness and fuzziness phenomena in scientific studies. II. Applications // Moscow University Physics Bulletin. 2017. Vol. 72. Issue 2. Pp. 113–127. DOI: 10.3103/S0027134917010131

23. Khekert E.V., Popov A.N., Yusupov L.N. The representativeness of the experiment results with the navigator's intelligent support system // Operation of Maritime Transport. 2020. Vol. 95. Issue 2. Pp. 53–59. DOI: 10.34046/aumsuomt95/9

24. Volodarsky Y., Pototskiy I., Warsza Z.L. The use of cusum-charts for identification the technological process disorder at the initial stage. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Pp. 147–156. DOI: 10.1007/978-3-030-40971-5_14

25. Oblakova T.V. Statistical justification of Pearson's criterion for testing a complex hypothesis on the uniform distribution // Mechanical Engineering and Computer Science. 2018. Issue 4. Pp. 45–53. DOI: 10.24108/0418.0001392

26. Starovoitov V.V., Eldarova E.E., Iskakov K.T. Comparative analysis of the SSIM index and the Pearson coefficient as a criterion for image similarity // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. 2020. Vol. 8. Issue 1. Pp. 76–90. DOI: 10.32523/2306-6172-2020-8-1-76-90

27. Larkin E., Bogomolov A., Gorbachev D., Privolov A. About approach of the transactions flow to poison one in robot control systems. Lecture Notes in Computer Science. 2017. Pp. 113–122. DOI: 10.1007/978-3-319-66471-2_13

28. Gatelyuk O.V., Nesevac V.L., Erbes V.V. Analysis of measurement data in a direct current traction power-supply system with uncontrolled rectifiers // Russian Electrical Engineering. 2019. Vol. 90. Issue 2. Pp. 180–186. DOI: 10.3103/S1068371219020032

29. Timashev A.N. Limit poisson law for the distribution of the number of components in generalized allocation scheme // Discrete Mathematics and Applications. 2019. Vol. 29. Issue 4. Pp. 255–266. DOI: 10.1515/dma-2019-0023

30. Trukhanov V.M., Sultanov M.M., Kukhtik M.P., Gorban Yu.A. Mathematical model of failure prediction by statistical method at testing of prototypes of heat-power equipment // Safety and Reliability of Power Industry. 2018. Vol. 11. Issue 3. Pp. 235–240. DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-3-235-240

Поступила в редакцию 9 ноября 2020 г.

Принята в доработанном виде 13 ноября 2020 г.

Одобрена для публикации 20 ноября 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: Сергей Александрович Волков — начальник управления информационного моделирования; Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» «Отраслевой центр капитального строительства» (Госкорпорация «Росатом» «ОЦКС»); 119180, г. Москва, Старомонетный пер., д. 26; serge.volkov@gmail.com;

Татьяна Владимировна Хрипко — кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и электроснабжения; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 640489; ProkhorovaTV@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Volkov A.A., Chelyshkov P.D., Sedov A.V., Krasnovsky B.M., Paziuk Y.V., Lysenko D.A. Prospects for the development and implementation of models and techniques for perspective resource modeling of industrial facilities. *Natural and Technical Sciences*. 2014; 9-10(77):254-255. (rus.).

2. Chelyshkov P.D. Aspects of computer-aided design of cyber-physical building systems. *Industrial and Civil Engineering*. 2018; 9:21-27. (rus.).

3. Chelyshkov P.D. Cyberphysical integration of building systems. *Natural and Technical Sciences*. 2018; 6(120):198-200. (rus.).

4. Volkov A., Sedov A., Chelyshkov P., Pavlov A., Kievskiy L. Promising energy and ecological modeling in computer-aided design. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016; 3(11):1645-1648.

5. Katzenbach A., Handschuh S., Vettermann S. *JT format (ISO 14306) and AP 242 (ISO 10303): The*

step to the next generation collaborative product creation. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013; 41-52. DOI: 10.1007/978-3-642-41329-2_6

6. Volkov A., Sukneva L. Programming applications of computer aided design and layout of the complex solar panels. *Applied Mechanics and Materials*. 2013; 411-414:1840-1843. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.411-414.1840

7. Volkov A., Muminova S. Devaluation modeling for residential buildings. *Advanced Materials Research*. 2014; 860-863:2864-2867. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.860-863.2864

8. Volkov A., Chulkov V., Kazaryan R., Sinenko S. Acting adaptation and human parity in the triad “man — Knowledge — Methods”. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 584-586:2681-2684. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.584-586.2681

9. Volkov A.A., Vasilkin A. Optimal design of the steel structure by the sequence of partial optimization. *Procedia Engineering*. 2016; 153:850-855. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.176

10. Volkov A., Chulkov V., Kazaryan R., Gazaryan R. Cycle reorganization as model of dynamics change and development norm in every living and artificial beings. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 584-586:2685-2688. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.584-586.2685

11. Volkov A.A., Roytman V.M., Shilova L.A. Model of stability of life support systems in emergency situations. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016; 11(3):1666-1669.

12. Volkov A., Sedov A., Chelyshkov P., Kulikova E. Modeling the thermal comfort of internal building spaces in hospital. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 584-586:753-756. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.584-586.753

13. Volkov A., Chelyshkov P., Grossman Y., Khromenkova A. BIM cost analysis of transport infrastructure projects. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017; 90:012203. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012203

14. Volkov A., Sedov A., Chelyshkov P. Modeling the thermal comfort of internal building spaces in social buildings. *Procedia Engineering*. 2014; 91:362-367. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.075

15. Volkov A., Sedov A., Chelyshkov P., Kulikova E. Modeling the thermal comfort of internal building spaces in kindergarten. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 584-586:757-760. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.584-586.757

16. Lysenko D., Chelyshkov P. The method of optimization of energy-efficient engineering solutions by varying criteria in CAD. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:022027. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022027

17. Lapko A.V., Lapko V.A. Selection of the optimal number of intervals sampling the region of values of a two-dimensional random variable. *Measurement Techniques*. 2016; 59(2):122-126. DOI: 10.1007/s11018-016-0928-y

18. Aleksandrova T., Gromakov E., Chugunov R., Syramkin V. Virtual analysis of technical equipment operational states variability. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 79:01006. DOI: 10.1051/mateconf/20167901006

19. Gromyschova S.S., Astashkov N.P., Olentsevich V.A., Lobanov O.V. Safety level assessment of complexly structured transport systems with the purpose of increasing the level of their competitiveness in the market of transport services. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2019; 2(62):250-259. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.2(62).250-259

20. Lutin V.I., Khripunov Y.V., Desyatirikova E.N., Myshovskaya L.P., Lapshina K.N. Automatic quality control of processes in the online educational environment. *2019 International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS)*. 2019; 634-638. DOI: 10.1109/ITQMIS.2019.8928311

21. Svyd I., Obod I., Maltsev O., Shtykh I., Zavalodko G. Model and method for detecting request signals in identification friend or foe systems. *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*. 2019. DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779322

22. Pyt'ev Y.P. Mathematical modeling of randomness and fuzziness phenomena in scientific studies. II. Applications. *Moscow University Physics Bulletin*. 2017; 72(2):113-127. DOI: 10.3103/S0027134917010131

23. Khekert E.V., Popov A.N., Yusupov L.N. The representativeness of the experiment results with the navigator's intelligent support system. *Operation of Maritime Transport*. 2020; 95(2):53-59. DOI: 10.34046/aumsuomt95/9

24. Volodarsky Y., Pototskiy I., Warsza Z.L. *The use of cusum-charts for identification the technological process disorder at the initial stage*. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020; 147-156. DOI: 10.1007/978-3-030-40971-5_14

25. Oblakova T.V. Statistical justification of Pearson's criterion for testing a complex hypothesis on the uniform distribution. *Mechanical Engineering and Computer Science*. 2018; 4:45-53. DOI: 10.24108/0418.0001392

26. Starovoitov V.V., Eldarova E.E., Iskakov K.T. Comparative analysis of the SSIM index and the pearson coefficient as a criterion for image similarity. *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications*. 2020; 8(1):76-90. DOI: 10.32523/2306-6172-2020-8-1-76-90

27. Larkin E., Bogomolov A., Gorbachev D., Privalov A. *About approach of the transactions flow to poisson one in robot control systems*. Lecture Notes in Computer Science. 2017; 113-122. DOI: 10.1007/978-3-319-66471-2_13

28. Gatelyuk O.V., Nesevac V.L., Erbes V.V. Analysis of measurement data in a direct current traction power-supply system with uncontrolled rectifiers. *Russian Electrical Engineering*. 2019; 90(2):180-186. DOI: 10.3103/S1068371219020032

29. Timashev A.N. Limit poisson law for the distribution of the number of components in generalized allocation scheme. *Discrete Mathematics and Applications*. 2019; 29(4):255-266. DOI: 10.1515/dma-2019-0023

30. Trukhanov V.M., Sultanov M.M., Kukhtik M.P., Gorban Yu.A. Mathematical model of failure prediction by statistical method at testing of prototypes of heat-power equipment. *Safety and Reliability of Power Industry*. 2018; 11(3):235-240. DOI: 10.24223/1999-5555-2018-11-3-235-240

Received November 9, 2020.

Adopted in revised form on November 13, 2020.

Approved for publication on November 20, 2020.

B I O N O T E S: **Sergey A. Volkov** — Head of Information Modeling Department; **Centre of Expertise for Major Construction Projects, Private Enterprise of the Rosatom State Atomic Energy Corporation (CEMCP ROSATOM)**; 26 Staromonetnyi lane, Moscow, 119180, Russian Federation; serge.volkov@gmail.com;

Tatiana V. Khripko — Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Automation and Power Supply; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 640489; ProkhorovaTV@mgsu.ru.

Мировой опыт и перспективы разработки схем механизации строительства атомных электростанций

И.Е. Воронков¹, Н.В. Овинкин²

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

² *Институт по изысканиям и проектированию транспортных и инженерных сооружений «Мосинжпроект» (Институт «Мосинжпроект»); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Совершенствование методов возведения основных сооружений атомных электрических станций (АЭС) невозможно без актуализации старых и разработки принципиально новых схем механизации строительного производства. На основании анализа мирового опыта применения на площадках сооружения АЭС различных типов грузоподъемных механизмов предлагается оценить текущее состояние и перспективы развития организационно-технологических подходов к разработке эффективных схем механизации строительного производства при возведении объектов использования атомной энергии.

Материалы и методы. Обзор отечественного и мирового (Великобритания, США, Япония) опыта строительства АЭС позволяет утверждать, что, несмотря на технологические и организационно-управленческие трудности, возведение энергоблоков АЭС укрупненными блоками высокой заводской готовности по-прежнему остается перспективным и целесообразным. Реализация данного подхода предполагает проектирование и изготовление уникальных грузоподъемных механизмов, наибольшую популярность среди которых в настоящее время получили мачтовые краны на гусеничном или рельсовом ходу. При этом незаслуженно забыт опыт возведения АЭС СССР и Великобритании с использованием козловых кранов.

Результаты. Выполненный сравнительный анализ применимости кранов башенного, мачтового и мостового (козлового) типов дает возможность признать высокую сложность использования при строительстве АЭС кранов козлового типа и конструктивную ограниченность кранов других типов. Ключевые недостатки козловых кранов кроются в использовании ими рельсового пути, замена которого на пневмоколесное шасси, получившее в последние 20 лет существенное развитие, может открыть новые перспективы для реинжиниринга ранее применяемых схем механизации строительства АЭС.

Выводы. Использование при строительстве АЭС в качестве основного грузоподъемного механизма крана мостового типа, оборудованного пневмоколесным шасси, является одним из перспективных технологических направлений развития атомного энергетического строительства. Разработка и внедрение новых схем механизации строительного производства на основе имеющегося опыта и передовых технологий в машиностроении может обеспечить качественное совершенствование осуществляемой инвестиционно-строительной деятельности в области атомной энергетики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: схема механизации, строительство АЭС, возведение здания реактора, кран мостового типа, козловой кран, основной грузоподъемный механизм, пневмоколесное шасси

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Воронков И.Е., Овинкин Н.В. Мировой опыт и перспективы разработки схем механизации строительства атомных электростанций // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 11. С. 1584–1596. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1584-1596

World experience and development prospects of mechanization scheme of nuclear power plants construction

Ivan E. Voronkov¹, Nikita V. Ovinkin²

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

² *Institute for Research and Design of Transport and Engineering Structures "Mosinzhproekt" (Institute "Mosinzhproekt"); Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Improvement of construction methods for the main structures of nuclear power plants (NPP) is impossible without updating the old and developing fundamentally new schemes for mechanization of construction production. Based on the analysis of world experience in using various types of lifting mechanisms at NPP construction sites, it is proposed to assess the current state and perspective for the development of organizational and technological approaches to the development of effective mechanization of construction production in the construction of atomic energy facilities.

Materials and methods. Review of domestic and world (UK, USA, Japan) experience in NPP construction allows us to assert that despite the technological and organizational and managerial difficulties, the construction of NPP power units by

enlarged units of high factory readiness still remains promising and feasible. The implementation of this approach involves the design and manufacture of unique hoisting mechanisms, the most popular of which are currently crawler or rail-mounted mast cranes. At the same time, the experience of constructing nuclear power plants of the USSR and Great Britain using gantry cranes was undeservedly forgotten.

Results. The performed comparative analysis of the applicability of tower, mast and bridge (gantry) types of cranes allows us to recognize the high complexity of using gantry cranes in the construction of NPPs and the structural limitations of other types of cranes. The main disadvantages of gantry cranes lie in their use of a rail track, the replacement of which with a pneumatic-wheeled chassis, which has undergone significant development in the last 20 years, can open up new perspective for the reengineering of previously used mechanization schemes for NPP construction.

Conclusions. Using main lifting mechanism of an overhead crane equipped with a pneumatic wheel chassis in the construction of nuclear power becomes one of the most promising options in the development of nuclear energy construction. The development and implementation of new schemes for the mechanization of construction production based on experience and advanced technologies in mechanical engineering can provide a qualitative improvement of the ongoing investment and construction activities in the field of nuclear energy.

KEYWORDS: mechanization scheme, construction of a nuclear power plant, construction of a reactor building, overhead type crane, gantry crane, main lifting mechanism, pneumatic wheel chassis

FOR CITATION: Voronkov I.E., Ovinkin N.V. World experience and development prospects of mechanization scheme of nuclear power plants construction. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(11): 1584-1596. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.11.1584-1596 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В современной России разработана госпрограмма развития атомной энергетики и ядерных технологий. Стратегия развития изложена в Постановлении Правительства РФ от 2.06.2014 № 506-12 (с изменениями от 18.06.2020) и направлена на стабильное и гарантированное обеспечение экономики энергоресурсами на основе безопасного использования атомной энергии для целей устойчивого экономического роста, закрепление лидирующих позиций российских компаний на мировом рынке ядерных технологий и услуг. В ближайшей перспективе планируется продолжение увеличения объема выработки электрической энергии атомными электростанциями, расположенными на территории России, составляющего не менее 207,6 млрд кВт·ч в год (на 2020 г.) до значения не менее 221,7 млрд кВт·ч в год (к 2027 г.)¹.

В условиях высокой потребности в возведении значительного количества объектов атомной энергетики возникает вопрос эффективного применения современных технологий строительства технически сложных объектов с повышенной ответственностью (Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ (ред. от 02.07.2013) «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»). Одним из наиболее дискуссионных в настоящее время является вопрос выбора схемы механизации строительства энергоблоков атомных электрических станций (АЭС) современных и перспективных проектов, которая позволила бы существенно сократить сроки воз-

ведения, ускорив ввод энергетических мощностей в эксплуатацию.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для наглядного представления проблемы и поиска путей ее решения целесообразно обратиться к анализу отечественного и международного опыта строительства объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) [1].

К 1986 г. в СССР был накоплен значительный опыт возведения уникальных зданий и сооружений. Масштабное строительство АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) [2] и канальными водо-графитовыми реакторами (реакторами большой мощности канальными (РБМК)) [3, 4] в 1960–1985 гг. позволяло непрерывно осваивать новые материалы, технологии и методы производства строительно-монтажных работ (СМР). Если для первых отечественных АЭС было характерно строительство по индивидуальным проектам, предполагающее использование для сооружения основных объектов преимущественно монолитных конструкций, то уже к середине 70-х годов был разработан и начал реализовываться план по строительству АЭС с реакторами ВВЭР по унифицированному проекту (В-320)². Проект предусматривал строительство на одной площадке 4–6 энергоблоков в моноблочной компоновке³. Строительно-технологической основой проекта стало:

- широкое внедрение поточного метода строительства;
- усиление специализации и профилизации организаций-исполнителей работ;

¹ Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие атомного энергопромышленного комплекса»: Постановление Правительства РФ от 02.06.2014 в ред. от 18.06.2020 № 506-12 // Собрание законодательства Российской Федерации № 26 от 29.06.2020 (Раздел IV Постановления и распоряжения Правительства РФ) ст. 4110.

² *Санин И.Л.* Поточное строительство и монтаж АЭС с ВВЭР-1000 // Атомная энергия. 1983. Т. 55. № 1. С. 3–8.

³ *Денисов В.П., Драгунов Ю.Г.* Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИздАТ, 2002. 480 с.

- использование строительных конструкций высокой заводской готовности;
- ориентация на крупноблочный монтаж строительных конструкций;
- значительное повышение степени механизации СМР.

Успешность реализации данного подхода находилась в прямой зависимости от обеспечения строительного производства необходимыми средствами механизации и, в первую очередь, успешности разработки проекта возведения реакторного и турбинного отделений современными кранами высокой грузоподъемности. При этом наиболее грузоподъемные отечественные краны, используемые в то время в энергетическом строительстве, не позволяли реализовать задуманный подход. Так, например, наиболее «мощный» кран, производимый в СССР, СКР-3500АЭС обладал предельной грузоподъемностью 160 т, что было недостаточно для монтажа укрупненных блоков унифицированного проекта и требовало для монтажа отдельных элементов, например купола здания реактора, одновременной работы сразу двух кранов, что приводило как к удорожанию проекта, так и к снижению общей эффективности схемы механизации.

Итогом разработки перспективных схем механизации строительства АЭС унифицированного проекта В-320 стала разработка двух уникальных подходов, достаточно успешно реализованных впоследствии при строительстве Запорожской и Балаковской АЭС.

Первый предусматривал использование в качестве основного грузоподъемного механизма двухбашенного самоходного крана на рельсовом ходу Kroll K-10000, производимого в Дании [5]. Данный кран обладал впечатляющими показателями грузового момента (10 000 т·м) и максимальной грузоподъемности (360 т). Ключевой задачей данного механизма являлся монтаж укрупненных блоков конструкций реакторного здания. Смежные работы по реакторному и турбинному зданиям в рамках проекта должны были выполняться кранами СКР-3500 и СКР-2200. Отечественные специалисты были далеко не первыми, кто обратил внимание на данный грузоподъемный механизм. В 1979 г. первый Kroll K-10000 был доставлен и установлен в проектное положение на строительной площадке АЭС Ойстер Крик (Форкед Ривер) в США [6].

В соответствии с разработанной для данного подхода схемой механизации укрупнительная сборка армометаллических блоков [7] проектной резки в монтажные осуществлялась на полигоне строительного монтажной базы козловыми кранами КС-50-42. Транспортировка от места укрупнения в зону монтажа производилась на сцепе железнодорожных платформ, оборудованных грузовой рамой [8]. Наиболее полноценной и успешной реализацией данного подхода можно признать строительство Запо-

рожской АЭС, где в 1980–1996 гг. было возведено 6 энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000. Использование в качестве основного грузоподъемного механизма башенного крана Kroll K-10000 позволило проводить монтаж элементов массой до 200 т и выполнить установку купола здания реактора одним блоком массой 210 т.

Применение этой схемы механизации на практике потребовало высоких затрат на создание соответствующей инфраструктуры и развитие строительного-монтажной базы АЭС [9]. При этом впоследствии неоднократно подвергалось критике реальное недоиспользование предельных грузоподъемных характеристик основного крана.

Второй значимый проект механизации строительства основных зданий АЭС предусматривал проектирование и изготовление на Запорожском энергомеханическом заводе уникального грузоподъемного механизма мостового типа — козлового крана К2 × 100/190/380 (К2 × 190) [10], способного:

- осуществлять монтаж конструкций и оборудования весом до 380 т;
- перекрывать пролет в 80 м;
- обеспечивать высоту подъема крюка до 70 м.

Использование данного крана с двухконсольным мостом и рельсово-колесной ходовой частью в рамках проекта должно было обеспечить охват всего реакторного отделения главного корпуса и позволить применить предельные характеристики крана для монтажа конструкций и оборудования в любой части и на любой отметке здания.

Параллельно с козловым краном СМР работы на основных зданиях выполняли краны СКР-2600. Для обеспечения доставки укрупненных блоков в монтажную зону крана в рамках данного проекта уже было недостаточно сцепки железнодорожных платформ. С этой целью была разработана уникальная плазовая технология: арматурно-опалубочные блоки изготавливались в цеховых условиях, собирались, укрупнялись на специально изготовленных металлических, жестких, мобильных (на рельсовом ходу) платформах — плазах-кондукторах, размещаемых на укрупнительно-сборочных площадках строительного-монтажной базы, которые затем по рельсовым путям с помощью тележек от кранов БК-1000 подавались в зону монтажа под козловой кран.

Применение плазовой технологии и схемы механизации с козловым краном К2×100/190/380 позволило при сооружении Балаковской АЭС [11] изготавливать на строительного-монтажной базе, транспортировать и монтировать блоки массой до 340 т и габаритами в плане до 40 × 60 м. Внешний вид и взаиморасположение козлового крана К2 × 100/190/380 и плазы-кондуктора, использованных при сооружении Балаковской АЭС, представлены на рис. 1.



Рис. 1. Козловой кран K2×100/190/380 (справа) и плаза-кондуктор (слева) на сооружении Балаковской АЭС

Fig. 1. Gantry crane K2×100/190/380 (right) and Plaza conductor (left) at the construction of the Balakovo NPP

Опыт строительства четырех блоков Балаковской АЭС, с одной стороны, подтвердил актуальность и перспективность разработанной схемы механизации, но, с другой стороны, продемонстрировал недостаточную глубину проработки организационно-технологических и конструктивных решений, ставшую преградой на пути полноценного использования уникального даже для мировой практики грузоподъемного механизма, которым являлся козловой кран K2×100/190/380. Множество вопросов вызывала также рентабельность проектирования и изготовления чрезвычайно материалоемких плаз для транспортировки укрупненных блоков конструкций, а также совокупные затраты на организацию соответствующей транспортной инфраструктуры.

Мировой опыт возведения ОИАЭ также содержит достаточно успешные примеры строительства АЭС с использованием крановых механизмов высокой грузоподъемности.

Реализация в Великобритании в 1967–1977 гг. проекта строительства АЭС «Хантерстон В» [12] с двумя энергоблоками, использующими улучшенные реакторы с газовым охлаждением (Advanced gas-cooled reactor — AGR) [13], основывалась на использовании козловых кранов с высокими грузоподъемными характеристиками. Несмотря на чрезвычайно высокую по тем временам конструктивную сложность реакторной установки данного типа,

относительно успешный английский опыт использования кранов мостового типа в атомном энергетическом строительстве стал серьезным драйвером развития данной схемы механизации в мировой практике строительства АЭС. Именно опыт строительства АЭС «Хантерстон В» послужил основой для разработки впоследствии схемы механизации строительства Балаковской АЭС в СССР.

Реализуемые в конце 70-х – начале 90-х гг. на территории США проекты строительства АЭС также предусматривали использование «мощных» кранов. После прекращения реализации проекта АЭС «Ойстер Крик» (Форкед Ривер) [14], обусловленного произошедшей 28 марта 1979 г. аварией на АЭС «Три-Майл-Айлен» [15], приобретенный для монтажа укрупненных блоков кран Kroll K-10000 был перебазирован на строительство АЭС «Сибрук» [16]. Несмотря на многочисленные протесты общественности, проект данной АЭС был частично реализован (один энергоблок из двух запланированных), однако существенное снижение темпов ввода в эксплуатацию новых энергоблоков АЭС после аварии на Чернобыльской АЭС [17] принципиальным образом повлияло на дальнейшие разработки в части механизации строительства ОИАЭ.

Наиболее современный из разработанных американской компанией Westinghouse Electric Company [18] проект сооружения двухблочной АЭС

с реакторами AP1000 [19] отличается от всех предыдущих решений использованием, пожалуй, самого «мощного» за всю историю атомного энергетического строительства мачтового крана Bigge 125D AFRD.

Колоссальная грузоподъемность данного крана — 7500 т, высота подъема крюка свыше 150 м и вылет 160 м в условиях организации кольцевого подкранового рельсового пути позволяют использовать его для работы параллельно на двух энергоблоках, что значительно увеличивает задействованность данного механизма, повышая рентабельность принятой схемы механизации.

Выбор данного типа крана обусловлен принятой концепцией изготовления и монтажа чрезвычайно габаритных и тяжелых блоков строительных конструкций с частичным монтажом оборудования. Масса таких блоков в рамках проекта AP1000-2005 достигает 1000 т. Схема мачтового крана Bigge 125D AFRD представлена на рис. 2.

Японский опыт строительства АЭС также содержит достаточно показательные примеры уни-

кальных схем механизации. Островное расположение исторически предопределило концентрацию производств на прибрежных территориях, что было с выгодой использовано при строительстве АЭС. Так, например, при сооружении энергоблоков № 6 и 7 АЭС «Касивадзаки-Карива» [20], использующих улучшенные кипящие ядерные реакторы (Advanced Boiling Water Reactor — ABWR) [21], принятая схема механизации предусматривала:

- высокую заводскую готовность укрупненных элементов;
- доставку блоков-модулей с предприятий-изготовителей морским транспортом до площадки строительства;
- монтаж блоков-модулей мачтовым гусеничным краном высокой грузоподъемности.

Такой подход обеспечил успешное выполнение работ по изготовлению, транспортировке и монтажу блоков весом до 650 т, а само сооружение АЭС было завершено в рекордные сроки. Строительство двух указанных энергоблоков заняло менее шести лет [8].

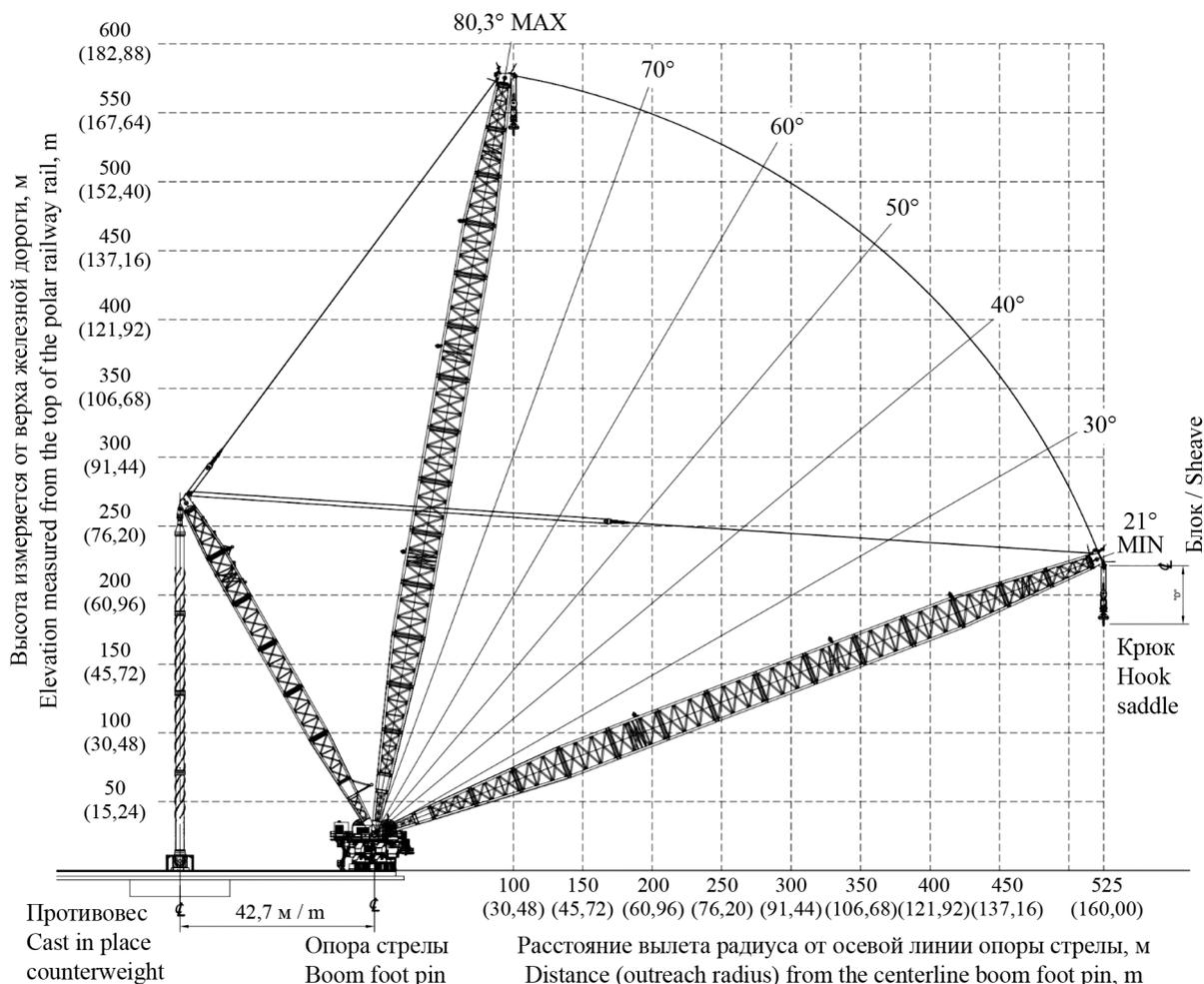


Рис. 2. Схема мачтового крана Bigge 125D AFRD

Fig. 2. Bigge 125D AFRD mast crane diagram

Представленный обзор реализации уникальных схем механизации строительства АЭС позволяет утверждать, что накопленный к настоящему моменту организационно-технологический опыт свидетельствует о перспективности и целесообразности использования в атомном энергетическом строительстве уникальных грузоподъемных механизмов, а также значимости комплексной проработки и организации всей транспортной инфраструктуры площадки строительства АЭС. Значительные затраты на разработку, изготовление, доставку и установку крана, организацию подъездных путей, устройство технологически оснащенной строительной-монтажной базы могут быть компенсированы эффективностью организации строительного производства, что становится наиболее актуально при строительстве на одной площадке нескольких энергоблоков одного типа.

Разработка той или иной схемы механизации при строительстве АЭС происходит зачастую на основании оценки параметров реакторного отделения и его основной части — защитной оболочки (кон-

тейнмента) [22] и конструкций внутри нее. Именно этот объект определяет общую продолжительность строительства — один из основных показателей эффективности.

Высота внешней защитной оболочки АЭС современных проектов достигает 75–80 м, диаметр наружной оболочки до 55 м. Необходимый вылет крана в таком случае должен составлять 55–65 м. Максимальная масса поднимаемого груза зависит от принятых в проекте конструктивных и организационно-технологических решений. В данном вопросе в настоящее время происходит все большее смещение технологических подходов в сторону монтажа укрупненными блоками-модулями высокой заводской готовности, замены традиционного стержневого армирования железобетонных конструкций на внешнее, листовое с использованием стального листа и в качестве несъемной опалубки [23], внедрения фибробетонной опалубки [24]. Сравнительные характеристики кранов, используемых сейчас при строительстве АЭС, представлены в табл. 1.

Табл. 1. Основные грузоподъемные механизмы при строительстве АЭС

Table 1. The Main lifting mechanisms in the construction of nuclear power plants

Наименование крана Crane name	Параметры крана / Crane parameters					
	Грузовой момент, т·м Load moment, t·m	Максимальная грузоподъемность, т Maximum lifting capacity, t	Грузовой момент, т·м Load moment, t·m	Вылет стрелы, м Boom reach, m	Грузовой момент, т·м Load moment, t·m	Масса крана с балластом, т Crane weight with ballast, t
БК-1000А ВК-1000А	10 000	63	88,5	45	Ширина колеи — 10 Track gauge — 10	375
СКР-3500 SKR-3500	25 000	630	155	62	Ширина колеи — 15 Track gauge — 15	620
СКР-2200 SKR-2200	2600	400	99	45	Ширина колеи — 13,5 Track gauge — 13.5	460
К-25000 «Кролл» К-25000 “Kroll”	25 000	400	> 88	> 57	Ширина колеи — 22 Track gauge — 22	>1260
DEMAG CC 4000	> 9250	550	96	80	Расстояние от оси крана до оси контргруза — 20 Distance from the crane axis to the counterweight axis — 20	>800
К190'2	—	380	80	—	Пролет >70 Crane gantry span >70	1100
DEMAG CC6800	> 15 850	1250	150	95	Расстояние от оси крана до оси контргруза — 30 Distance from the crane axis to the counterweight axis — 30	>1000

Наименование крана Crane name	Параметры крана / Crane parameters					
	Грузовой момент, т·м Load moment, t·m	Максимальная грузоподъемность, т Maximum lifting capacity, t	Грузовой момент, т·м Load moment, t·m	Вылет стрелы, м Boom reach, m	Грузовой момент, т·м Load moment, t·m	Масса крана с балластом, т Crane weight with ballast, t
DEMAG CC 8800-1-twin	43 900	3200	156	115	Расстояние от оси крана до оси контргруза — 35 Distance from the crane axis to the counterweight axis — 35	>1500
Liebherr LR13000	65 000	3000	до 240	200	Расстояние от оси крана до оси контргруза — 30 Distance from the crane axis to the counterweight axis — 30	>2300
Mammoet MSG 80	> 70 000	3072	101,3	100	Радиус платформы — 18 Platform radius — 18	>3000
DEMAG CC 12600	39 000	1600	114	102	Расстояние от оси крана до оси контргруза — 37 Distance from the crane axis to the counterweight axis — 37	>1500
Lampson LTL2600	40 000	2400	140	73	Расстояние от оси крана до оси контргруза — 30 Distance from the crane axis to the counterweight axis — 30	>1500
SGC - 120 Sarens	120 000	3200	120	125	Расстояние между центром крана и наружной кольцевой базой — 43,6 Distance between the center of the crane and the outer ring base 43.6	3600 только балласт (3600 only ballast)
SGC - 250 Sarens	250 000	5000	до 160,5	> 100	Расстояние между центром крана и наружной кольцевой базой — 48,5 Distance between the center of the crane and the outer ring base — 48.5	5200 только балласт (5200 only ballast)
Manitowoc 31000	35 800	2300	120	100,6	Расстояние от оси крана до оси контргруза — 32 Distance from the crane axis to the counterweight axis — 32	2300 только балласт (2300 only ballast)
Bigge 125D AFRD	> 250 000	6803	167	> 31	Расстояние между центром крана и наружной кольцевой базой — 43 Distance between the center of the crane and the outer ring base — 43	-

Среди производителей наиболее грузоподъемных кранов следует выделить такие компании, как: Bigge, ALE, Sany, Mammoet, Sarens, Terex, Liebherr, Lampson. К сожалению, можно констатировать, что среди перечисленных лидеров нет ни одной российской компании-изготовителя, что делает отечественную отрасль атомного энергетического строительства чрезвычайно зависимой от иностранных производителей грузоподъемной техники.

В данных условиях перед Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» стоит принципиальная задача разработки эффективной схемы механизации строительства энергоблоков АЭС перспективных проектов с учетом всего накопленного в мировой практике организационно-технологического опыта и достижения максимальной независимости от иностранных контрагентов в вопросах технического оснащения строительного производства.

Решение этой задачи предполагает как концептуальное определение наиболее перспективных методов и способов возведения зданий основного производственного назначения АЭС, так и организацию широкомасштабной работы по техническому переоснащению крупнейших подрядных организаций, участвующих в реализации инвестиционно-строительных проектов сооружения АЭС [25, 26].

В условиях возрастающего интереса к крупноблочному монтажу и последовательному увеличению требований к техническим характеристикам кранов именно определение наиболее подходящего типа основного грузоподъемного механизма может решающим образом сказаться на эффективности реализации всего проекта. Сравнительная оценка кранов четырех различных типов (подтипов) с учетом характерных для них негативных организационно-технологических аспектов использования представлена в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обзор отечественного и иностранного опыта организации возведения ОИАЭ, сравнительный анализ перспектив использования кранов различных типов позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Использование при сооружении АЭС кранов башенного типа практически не имеет перспектив ввиду их высокой зависимости от погодных условий, невозможности использования одновременно на сооружении нескольких энергоблоков, а также фактически самой низкой из рассматриваемых типов кранов потенциальной грузоподъемности на требуемом вылете.

2. Использование мачтовых кранов на рельсовом ходу с кольцевым устройством рельсового пути,

отличающихся чрезвычайно высокими грузовыми характеристиками и относительной независимостью от погодных условий, можно признать целесообразным и перспективным, однако это потребует кардинальной переработки (перекомпоновки) современных отечественных проектов строительства АЭС с увеличением расстояния между энергоблоками.

3. Наименьшие трудности на данный момент вызывает использование при сооружении энергоблоков АЭС мачтового крана на гусеничном ходу, но данный тип крана может в перспективе не обеспечить условия для монтажа наиболее крупных блоков строительных конструкций (более 500 т), что при сохранении текущих трендов увеличения масштаба реализации метода крупноблочного монтажа угрожает стать существенной преградой на пути применения этого типа кранов.

4. Козловой кран (кран мостового типа) на рельсовом ходу представляется из рассматриваемых наименее подходящим для атомного энергетического строительства ввиду существенных ограничений, вызванных необходимостью устройства для него подкрановых путей, ограничивающих возможность использования окружающей здание реактора инфраструктуры.

Следует отметить, что ключевые недостатки крана мостового типа проистекают из используемого им механизма опирания и перемещения. Использование рельсового подкранового пути в случае с козловым краном является ключевой проблемой, существенно ограничивающей возможности применения кранов данного типа. Несмотря на технический прогресс в области промышленного краностроения в последние 40 лет, немногочисленные попытки реанимировать схему механизации, использованную при строительстве Балаковской АЭС, базируются на применении козлового крана на рельсовом ходу, в то время как наиболее активно развивающийся в настоящий момент пневмоколесный ход исключается из возможного рассмотрения.

Отсутствие сегодня опытных образцов козловых кранов для атомного энергетического строительства в реальности открывает возможности для принципиального переосмысления реализации монтажа укрупненных блоков козловым краном. В случае замены рельсового пути пневмоколесным шасси теоретически удастся избежать главных недостатков, характерных для кранов такого типа.

В последние 20 лет пневмоколесные краны получили широкое распространение в работе портов, в некоторой степени вытеснив оттуда краны на рельсовом ходу. В промышленном производстве находятся пневмоколесные козловые краны грузоподъемностью до 450 т, пролетом до 50 м и высотой подъема крюка до 30 м. Обладая значительно

Табл. 2. Негативные организационно-технологические аспекты использования в строительстве АЭС кранов различных типов
 Table. 2. Negative organizational and technological aspects of using various types of cranes in NPP construction

Тип используемого крана Type of crane used	Башенный кран высокой грузоподъемности (Кролл К-10000, Кролл К-28000 (проект)) High-capacity tower crane (Croll K-10000, Croll K-28000 (project))	Мачтовый кран на гусеничном ходу Crawler mast crane	Мачтовый кран на рельсовом ходу с кольцевым устройством рельсового пути Mast crane on a rail track with a ring device of a rail track	Козловой кран Gantry crane
Негативный организационно-технологический аспект использования Negative organizational and technological aspect of use	Отсутствие опытного образца Lack of a prototype	Необходимость расположения и регулярной перебазировки противовесов в местах высокой концентрации производственных процессов The need for the location and regular relocation of counterweights in areas of high concentration of production processes	Омертвление востребованной части территории промплощадки, занятой кольцевой площадкой крана Death of the demanded part of the territory of the industrial site occupied by the ring platform of the crane	Отсутствие опытного образца Lack of a prototype
	Невозможность использования параллельно на сооружении двух энергоблоков Inability to use two power units in parallel during construction	Существенное снижение грузоподъемных характеристик с увеличением вылета A significant reduction in load-carrying characteristics with an increase in departure	Существенное увеличение расстояния между энергоблоками, увеличение площади застройки A significant increase in the distance between power units, an increase in the area of development.	Невозможность использования параллельно на сооружении двух энергоблоков Inability to use two power units in parallel during construction
	Недостаточная грузоподъемность для монтажа наиболее тяжелых блоков-модулей и оборудования Insufficient load capacity for mounting the heaviest blocks-modules and equipment	Зависимость от погодных условий Dependence on weather conditions	Существенное снижение грузоподъемных характеристик с увеличением вылета A significant reduction in load-carrying characteristics with an increase in departure	Критическое пересечение транспортных путей козлового крана и путей других грузоподъемных механизмов, а также пересечение с транспортным порталом здания реактора Critical intersection of transport paths of the gantry crane and the paths of other lifting mechanisms, as well as the intersection with the transport portal of the reactor building
	Существенное снижение грузоподъемных характеристик с увеличением вылета A significant reduction in load-carrying characteristics with an increase in departure	—	—	Необходимость опережающего строительства подземных сооружений The need for advanced construction of underground structures
	Высокая зависимость от погодных условий High dependence on weather conditions	—	—	Высокая зависимость от погодных условий High dependence on weather conditions

большей мобильностью и сопоставимой грузоподъемностью, пневмоколенное шасси предъявляет гораздо меньшие требования к необходимой инфраструктуре и не оказывает столько негативного влияния на использование внутривозвратной инфраструктуры АЭС.

В сложившихся условиях перспектива возможной разработки отечественными специалистами, в том числе с широким привлечением иностранных компаний, современного козлового крана на пневмоколенном ходу для нужд атомного энергетического строительства представляется амбициозным проектом, способным при позитивном итоге осуществить революцию во взглядах на механизацию строительства энергоблоков АЭС. Применяя советский опыт проектирования, изготовления, эксплуатации крана К2×100/190/380, последние мировые разработки в области пневмоколенного машиностроения, возможно создание уникального грузоподъемного механизма, совмещающего преимущества кранов мостового типа с мобильностью и гибкостью использования пневмоколенных механизмов.

Развитие данного направления может обеспечить отечественные предприятия и конструкторские бюро дополнительным финансированием, инициировать трансферт в Российскую Федерацию передовых мировых машиностроительных технологий, и в перспективе дать толчок развитию строительства не только ОИАЭ, но и других уникальных промышленных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наличие в настоящий момент существенных преград на пути разработки перспективных схем механизации строительства энергоблоков АЭС определено, в первую очередь, историческими и текущими возможностями машиностроения. В условиях всеобщей глобализации и снижения барьеров трансферта технологий складывается благоприятная обстановка, способствующая переосмыслению ранее реализованных методов производства работ, применяемых технологий и используемых механизмов. Незаслуженно забытый опыт строительства Балаковской АЭС может быть использован отечественными специалистами для разработки уникальных схем механизации строительства АЭС перспективных проектов.

Результаты эволюции машиностроения в 1980–2010-х гг., цифровизация производств, внедрение автоматизированной работы с большими данными (Big data), технологии искусственного интеллекта, беспилотные летательные аппараты могут быть интегрированы в процесс строительства ОИАЭ, что позволит осуществить переход на новую стадию развития строительного производства, характеризующуюся снижением доли ручного труда, повышением качества и скорости выполнения работ, сокращением простоев технологического оборудования и механизмов, а также повысить рентабельность реализации инвестиционно-строительных проектов во всех областях, в том числе и в строительстве АЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарев В.В., Абакумова А.С., Крынев А.В. Обоснование выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии // Ядерная и радиационная безопасность. 2018. № 2 (88). С. 24–28.
2. Мурогов В.М. Критические заметки: история, состояние, проблемы и перспективы ядерной науки и техники // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2019. № 2. С. 55–66. DOI: 10.26583/пре.2019.2.05
3. Мелькумов В.Н., Чуйкин С.В., Складов К.А., Тульская С.Г. Конструкции реакторов атомных станций // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2016. № 3 (4). С. 14–23.
4. Song C. Irradiation effects on Zr-2.5nb in power reactors // CNL Nuclear Review. 2016. Vol. 5. Issue 1. Pp. 17–36. DOI: 10.12943/CNR.2016.00010
5. Santos D. Avaliação do melhor custo-benefício entre guas e manipuladores telescópicos para transporte de materiais em canteiros de obra. 2015. 41 p. URL: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/14688/1/CT_GEOB_XX_2014_07.pdf
6. Kiger C.J., Sexton C.D., Hashemian H.M., O'Hagan R.D., Dormann L., Wasfy W. Implementation of new cable condition-monitoring technology at Oyster Creek Nuclear Generating Station // Nuclear Technology. 2017. Vol. 200. Issue 2. Pp. 93–105. DOI: 10.1080/00295450.2017.1360716
7. Морозенко А.А., Шашков А.А. Организационно-технологические аспекты крупноблочного возведения атомных электростанций // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 5 (95). С. 28–33.
8. Морозенко А.А., Воронков И.Е. Повышение эффективности организационно-технологических решений при строительстве АЭС на основе современного российского и зарубежного опыта // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 10. С. 74–79.
9. Павлов А.С., Пергаменчик Б.К. Расчет объемов строительно-монтажных работ на ранних стадиях планирования // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 4. С. 59–63.

10. Кобзев А.П., Кобзев Р.А., Олейник М.Г. Применение принципа Парето при проектировании механизма передвижения козлового крана К2×190 для монтажа АЭС методом динамического программирования // Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения: военно-научный журнал. 2016. № 1 (37). С. 98–106.
11. Красовский Д.В., Рогачев К.В. Особенности возведения строительных конструкций АЭС // Энергетик. 2014. № 10. С. 48–49.
12. Wealer B., Bauer S., Göke L., Hirschhausen C.R., Kemfert C. High-priced and dangerous: Nuclear power is not an option for the climate-friendly energy mix // DIW Weekly Report. 2019. Vol. 9. Issue 30. Pp. 236–244. DOI: 10.18723/diw_dwr:2019-30-1
13. Berkman M., Murphy D. Salem and Hope Creek nuclear power plants' contribution to The New Jersey economy // The Brattle Group. 2017. URL: https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2017/12/Salem_and_Hope_Creek_Nuclear_Power_Plants_Contribution_to_the_New_Jersey_Economy.pdf
14. Blackall J.L., Iacovides H., Uribe J.C. Modeling of in-line tube banks inside advanced gas-cooled reactor boilers // Heat transfer engineering. 2019. DOI: 10.1080/01457632.2019.1640486.
15. Zhou T., Modarres M., Drogue E.L. A review of multi-unit nuclear power plant probabilistic risk assessment research // Vol. 2: Plant Systems, Structures, Components, and Materials; Risk Assessments and Management. 2018. DOI: 10.1115/ICONE26-81130
16. Николаева А.В., Гаспаров Д.Л., Пантюшин С.И., Букин Н.В., Быков М.А., Вахлярский Д.С. и др. Анализ возможности реализации тяжелых аварий α-типа на РУ ВВЭР-1200 // Тяжелое машиностроение. 2016. № 11–12. С. 39–47.
17. Нигматулин Б.И. Атомная энергетика в мире. Состояние и прогноз до 2050 года // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 4. С. 6–22. DOI: 10.18721/JEST.25401
18. Leipner C. Westinghouse small modular reactors: Innovative technologies for a flexible energy matrix. 2017. URL: <https://www.marinha.mil.br/dgdntm/sites/www.marinha.mil.br.dgdntm/files/arquivos/11-%20Westinghouse.pdf>
19. Shi H., Cai Q., Chen Y. Sensitivity evaluation of AP1000 nuclear power plant best estimation model // Science and Technology of Nuclear Installations. 2017. Vol. 2017. Pp. 1–13. DOI: 10.1155/2017/9304520
20. Matsuo Y., Nei M. Assessing the historical trend of nuclear power plant construction costs in Japan. The Institute of Energy Economics, 2018. URL: <https://enen.iecej.or.jp/data/7922.pdf>
21. Aksan N., D'Auria F., Glaeser H. Thermal-hydraulic phenomena for water cooled nuclear reactors // Nuclear Engineering and Design. 2018. Vol. 330. Pp. 166–186. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2018.01.035
22. Романов А.В. Численное моделирование системы преднапряжения защитных оболочек АЭС с использованием функций форм «неправильного» гексаэдра // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. № 6. С. 37–47.
23. Пергаменщик Б.К. Проблемы и перспективы строительства АЭС // Вестник МГСУ. 2014. № 2. С. 140–153. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.2.140-153
24. Красновский Р.О., Денисов А.В., Рогачев К.В., Капустин Д.Е. Подбор состава матрицы из цементно-песчаного раствора для производства несъемной опалубки АЭС нового поколения // Энергетик. 2015. № 7. С. 35–38.
25. Voronkov I.E. Evaluation and improvement of the reliability of organizational structures of ICP by the method of hierarchy analysis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. Issue 6. P. 062035. DOI: 10.1088/1757-899X/365/6/062035
26. Воронков И.Е. Основы механизмов оценки надежности предприятий — участников инвестиционно-строительных проектов как элементов организационной структуры // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 2 (113). С. 249–257. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.2.249-257

Поступила в редакцию 19 сентября 2020 г.

Принята в доработанном виде 16 ноября 2020 г.

Одобрена для публикации 20 ноября 2020 г.

ОБ АВТОРАХ: **Иван Евгеньевич Воронков** — кандидат технических наук, доцент кафедры строительства объектов тепловой и атомной энергетики; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 839965, Scopus: 57202806699, ResearcherID: AAW-4364-2020, ORCID: 0000-0003-1009-3557; VoronkovIE@mgsu.ru;

Никита Владимирович Овинкин — инженер 1-й категории, отдел оценки влияния строительства и противоаварийных мероприятий; **Институт по изысканиям и проектированию транспортных и инженерных сооружений «Мосинжпроект» (Институт «Мосинжпроект»)**; 101000, г. Москва, Сверчков пер., д. 4/1, ovinkingroupdirect.ru@yandex.ru.

REFERENCES

1. Bochkarev V.V., Abakumova A.S., Kryanev A.V. Justification of the choice of decommissioning option for nuclear facilities. *Nuclear and Radiation Safety Journal*. 2018; 2(88):24-28. (rus.).
2. Murogov V.M. Critical notes: history, state, problems and prospects of nuclear science and technology. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019; 2:55-66. DOI: 10.26583/npe.2019.2.05 (rus.).
3. Melkumov V.N., Chuikin S.V., Sklyarov K.A., Tulskeya S.G. Design of nuclear reactors. *Urban Planning. Infrastructure. Communications*. 2016; 3(4):14-23. (rus.).
4. Song C. Irradiation effects on Zr-2.5nb in power reactors. *CNL Nuclear Review*. 2016; 5(1):17-36. DOI: 10.12943/CNR.2016.00010
5. Santos D. *Evaluation of the best cost-benefit between cranes and telescopic handlers for transporting materials on construction sites*. 2015; 41. URL: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/14688/1/CT_GEOB_XX_2014_07.pdf
6. Kiger C.J., Sexton C.D., Hashemian H.M., O'Hagan R.D., Dormann L., Wasfy W. Implementation of new cable condition-monitoring technology at Oyster Creek Nuclear Generating Station. *Nuclear Technology*. 2017; 200(2):93-105. DOI: 10.1080/00295450.2017.1360716
7. Morozenko A.A., Shashkov A.A. Organizational and technological aspects of large-scale construction of nuclear power plants. *Science and Business: Development Ways*. 2019; 5(95):28-33. (rus.).
8. Morozenko A.A., Voronkov I.E. Increasing the efficiency of organizational and technological solutions in the construction of nuclear power plants on the basis of modern Russian and foreign experience. *Industrial and Civil Construction*. 2014; 10:74-79. (rus.).
9. Pavlov A.S., Pergamenshchik B.K. Calculation of scope of construction and erection works at early stages of planning. *Industrial and Civil Engineering*. 2014; 4:59-63. (rus.).
10. Kobzev A.P., Kobzev R.A., Oleinik M.G. Pareto principle application for the design of the mechanism of movement of gantry crane K2'190 for installation npp dynamic programming method. *Scientific Bulletin of the Volsky military Institute of material support: military scientific journal*. 2016; 1(37):98-106. (rus.).
11. Krasovskij D.V., Rogachyov K.V. Features of the construction of building structures of nuclear power plants. *Energetik*. 2014; 10:48-49. (rus.).
12. Wealer B., Bauer S., Göke L., Hirschhausen C.R., Kemfert C. High-priced and dangerous: Nuclear power is not an option for the climate-friendly energy mix. *DIW Weekly Report*. 2019; 9(30):236-244. DOI: 10.18723/diw_dwr:2019-30-1
13. Berkman M., Murphy D. Salem and Hope Creek nuclear power plants' contribution to The New Jersey economy. *The Brattle Group*. 2017. URL: https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2017/12/Salem_and_Hope_Creek_Nuclear_Power_Plants_Contribution_to_the_New_Jersey_Economy.pdf
14. Blackall J.L., Iacovides H., Uribe J.C. Modeling of in-line tube banks inside advanced gas-cooled reactor boilers. *Heat transfer engineering*. 2019. DOI: 10.1080/01457632.2019.1640486
15. Zhou T., Modarres M., Droguett E.L. A Review of Multi-Unit Nuclear Power Plant Probabilistic Risk Assessment Research. *Volume 2: Plant Systems, Structures, Components, and Materials; Risk Assessments and Management*. 2018. DOI: 10.1115/ICONE26-81130
16. Nikolaeva A.V., Gasparov D.L., Pantyushin S.I., Bukin N.V., Bykov M.A., Vakhlyarsky D.S. et al. Analysis of α -mode failure possibility for RP WWER-1200. *Heavy Engineering*. 2016; 11-12:39-47. (rus.).
17. Nigmatulin B.I. Nuclear industry in the world. State and forecast up to 2050. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2019; 25(4):6-22. DOI: 10.18721/JEST.25401 (rus.).
18. Leipner C. *Westinghouse small modular reactors: Innovative technologies for a flexible energy matrix*. 2017. URL: <https://www.marinha.mil.br/dgdntm/sites/www.marinha.mil.br/dgdntm/files/arquivos/11-%20Westinghouse.pdf>
19. Shi H., Cai Q., Chen Y. Sensitivity evaluation of API1000 nuclear power plant best estimation model. *Science and Technology of Nuclear Installations*. 2017; 2017:1-13. DOI: 10.1155/2017/9304520
20. Matsuo Y., Nei M. *Assessing the Historical Trend of Nuclear Power Plant Construction Costs in Japan*. The Institute of Energy Economics. 2018. URL: <https://eneken.ieej.or.jp/data/7922.pdf>
21. Aksan N., D'Auria F., Glaeser H. Thermal-hydraulic phenomena for water cooled nuclear reactors. *Nuclear Engineering and Design*. 2018; 330:166-186. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2018.01.035
22. Romanov A.V. Numerical modeling of NPP containment prestress system via functions of "irregular" hexahedron forms. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2015; 6:37-47. (rus.).
23. Pergamenshchik B.K. Problems and prospects of nuclear power plants construction. *Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil*

Engineering]. 2014; 2:140-153. DOI: 10.22227/1997-0935.2014.2.140-153 (rus.).

24. Krasnovskij R.O., Denisov A.V., Rogachev K.V., Kapustin D.E. Selection of the composition of the matrix of cement-sand mortar for the production of permanent formwork of a new generation of nuclear power plants. *Energetik*. 2015; 7:35-38. (rus.).

25. Voronkov I.E. Evaluation and improvement of the reliability of organizational structures of ICP by the method of hierarchy analysis. *IOP Conference*

Series: Materials Science and Engineering. 2018; 365(6):062035. DOI: 10.1088/1757-899X/365/6/062035

26. Voronkov I.E. Fundamentals of mechanisms for assessing the reliability of enterprises — participants in investment and construction projects as elements of the organizational structure. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13:2(113):249-257. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.2.249-257 (rus.).

Received September 19, 2020.

Adopted in revised form on November 16, 2020.

Approved for publication on November 20, 2020.

B I O N O T E S: **Ivan E. Voronkov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction of Thermal and Atomic Power Industry Buildings; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 839965, Scopus: 57202806699, ResearcherID: AAW-4364-2020, ORCID: 0000-0003-1009-3557; VoronkovIE@mgsu.ru;

Nikita V. Ovinkin — engineer of the 1st category of the Department assessment of the impact of construction and emergency measures; **Institute for Research and Design of Transport and Engineering Structures “Mosinzhproekt” (Institute “Mosinzhproekt”)**; 4/1 Sverchkov lane, Moscow, 101000, Russian Federation; ovinkingroupdirect.ru@yandex.ru.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ. ДИСКУССИИ И РЕЦЕНЗИИ. ИНФОРМАЦИЯ

Рецензия на учебное пособие «Фасадные строительные материалы» (2020 год)

А.Д. Жуков, В.С. Семенов, С.Ю. Шеховцова, Б.А. Ефимов

The review of the “Building facade materials” (2020) study guide

A.D. Zhukov, V.S. Semenov, S.Yu. Shekhovtsova, B.A. Efimov

Представленное на рецензию учебное пособие выполнено на 90 страницах, содержит 68 рисунков, 22 таблицы, список рекомендуемой литературы из 19 наименований, состоит из введения, перечня основных терминов и определений, семи глав и заключения. В конце каждой главы указаны вопросы для самопроверки и самоконтроля.

Выбирая систему отделки фасадов, с утеплением или без него, необходимо помнить, что здание само по себе является единой архитектурной, строительной и энергетической системой, все элементы которой (фасады, ограждающие конструкции, системы изоляции и инженерного обеспечения) взаимосвязаны. Изменение в системе наружной отделки влечет усложнение конструктивных узлов, а также инженерных решений, связанных с проектированием и устройством отопительных, водопроводных, водосточных и мусоропроводных систем, лифтового оборудования, что не только значительно повышает уровень затрат на строительство, но и сопровождается ростом эксплуатационных расходов.

В связи с этим, принятый авторами за основу системный подход актуален и позволяет в наибольшей степени использовать достоинства составляющих материалов (гидроизоляционных, парозащитных, теплоизоляционных, конструктивных, облицовочных и пр.) и выполнять конструкции не только с нормативными характеристиками, но и с сохранением этих характеристик наиболее длительные сроки.

Пособие адресовано студентам высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Строительство» и специальности «Строительство уникальных зданий и сооружений».

Учебное пособие опубликовано в электронном виде и доступно для пользователей. Оно выполнено на хорошем методическом и инженерном уровне, имеет практическую значимость, что позволяет рекомендовать авторов учебного пособия А.Д. Жукова, В.С. Семенова, С.Ю. Шеховцову, Б.А. Ефимову к выдвижению для участия в Конкурсе на медали и дипломы РААСН.

Владимир Трофимович Ерофеев,

доктор технических наук, профессор,

академик РААСН, заведующий кафедрой строительных материалов и технологий,

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список литературы.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²

¹ Место работы первого автора; город, страна

² Место работы второго автора; город, страна

АННОТАЦИЯ

Основной принцип создания аннотации — информативность. Объем аннотации — от 200 до 250 слов. Структура и содержание аннотации должны соответствовать структуре и содержанию основного текста статьи.

Аннотация к статье должна представлять краткую характеристику научной статьи. Задача аннотации — дать возможность читателю установить ее основное содержание, определить ее релевантность и решить, следует ли обращаться к полному тексту статьи.

Четкое структурирование аннотации позволяет не упустить основные элементы статьи. Структура аннотации аналогична структуре научной статьи и содержит следующие основные разделы:

- **Введение** — содержит описание предмета, целей и задач исследования, актуальность.
- **Материалы и методы** (или методология проведения работы) — описание использованных в исследовании информационных материалов, научных методов или методики проведения исследования
- **Результаты** — приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. Предпочтение отдается новым результатам и выводам, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.
- **Выводы** — четкое изложение выводов, которые могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, описанными в статье.
- **Ключевые слова** — перечисляются через запятую, количество — от 7 до 10 слов.

Благодарности. Краткое выражение благодарности персонам и/или организациям, которые оказали помощь в выполнении исследования или высказывали критические замечания в адрес вашей статьи. Также в разделе указывается источники финансирования исследования от организаций и фондов организациям и фондам, т.е. за счет каких грантов, контрактов, стипендий удалось провести исследование. Раздел приводится при необходимости.

Аннотация не должна содержать:

- избыточных вводных фраз («Автор статьи рассматривает...», «В данной статье...» и т.д.);
- абстрактного указания на время написания статьи («В настоящее время...», «На данный момент...», «На сегодняшний день...» и т.д.);
- общего описания;
- цитат, таблиц, диаграмм, аббревиатур;
- ссылок на источники литературы;
- информацию, которой нет в статье.

Англоязычная аннотация пишется по тем же правилам. Отметим, что английская аннотация не обязательно должна быть точным переводом русской.

Следует обращать особое внимание на корректность употребления терминов. Избегайте употребления терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных. Необходимо соблюдать единство терминологии в пределах аннотации.

Ключевые слова – прообраз статьи в поисковых системах, те точки, по которым читатель может найти вашу статью и определить предметную область текста. Чтобы определить основные ключевые слова для статьи, рекомендуется представить, по каким поисковым запросам читатели могут искать вашу статью. Как правило, ключевые слова также могут включать основную терминологию.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы:

- Введение;
- Материалы и методы;
- Результаты исследования;
- Заключение и обсуждение.

РИСУНКИ И ТАБЛИЦЫ

Рисунки и таблицы следует вставлять в текст статьи сразу после того абзаца, в котором рисунок впервые упоминается. Рисунки и таблицы должны быть оригинальными (либо с указанием источника), хорошего качества (не менее 300 dpi). Оригиналы рисунков предоставляются в файлах формата .jpg, .tiff (название файла должны соответствовать порядковому номеру рисунка в тексте) Размер шрифта должен соответствовать размеру шрифта основного текста статьи. Линии обязательно не тоньше 0,25 пунктов.

Заголовки таблиц и рисунков выравниваются по левому краю. Заголовок таблицы располагается над ней, начинаясь с сокращения «Табл.» и порядкового номера таблицы, подпись к рисунку располагается под ним, начинаясь с сокращения «Рис.» и порядкового номера. Рисунки и таблицы позиционируются по центру страницы.

Подрисуночные подписи и названия таблиц размещаются на русском и английском языках, каждый на новой строке с выравниванием по левому краю.

Образец:

Рис. 1. Пример рисунка в статье

Figure 1. Example of article image

Табл. 1. Пример таблицы в статье

Table 1. Example of table for article

ФОРМУЛЫ

Формулы должны быть набраны в редакторе формул MathType версии 6 или выше.

Цифры, греческие, готические и кириллические буквы набираются прямым шрифтом; латинские буквы для обозначения различных физических величин (A , F , b и т.п.) — курсивом; наименования тригонометрических функций, сокращенные наименования математических понятий на латинице (max, div, log и т.п.) — прямым; векторы (\mathbf{a} , \mathbf{b} и т.п.) — жирным курсивом; символы химических элементов на латинице (Cl, Mg) — прямым.

Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы составляется в порядке упоминания в тексте. Порядковый номер источника в тексте (ссылка) заключается в квадратные скобки. Текст статьи должен содержать ссылки на все источники из списка литературы. При наличии ссылки должны содержать идентификаторы DOI.

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу

их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Список литературы и сведения об авторах указываются последовательно на русском и английском языках.

Нормативные документы (постановления, распоряжения, уставы), ГОСТы, справочная литература не указываются в списках литературы, оформляются в виде сносок.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В **Сведениях об авторах (Bionotes)** представляется основная информация об авторском коллективе в следующем формате.

Имя, Отчество, Фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты; ORCID, ResearcherID и др. (при наличии).

Сведения об авторах представляются на русском и английском языках.

Сведения об авторах на английском языке даются в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus/WoS и т.д.

КАК ПОДГОТОВИТЬ ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ, ЧТОБЫ ЕЕ ПРИНЯЛИ К ПУБЛИКАЦИИ?

ЗАГОЛОВОК

Заголовок статьи должен **кратко и точно** (не более 10 слов) отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

ОСНОВНОЙ ТЕКСТ СТАТЬИ

Основной текст научной статьи, представляемой в журнал для рассмотрения вопроса о ее публикации, должен быть оформлен в соответствии со стандартом IMRaD и включать следующие разделы: введение (Introduction), материалы и методы (Materials and methods), результаты исследования (Result), заключение и обсуждение (Conclusion and discussion).

Введение (Introduction). Отражает то, какой проблеме посвящено исследование. Осуществляется постановка научной проблемы, ее актуальность, связь с важнейшими задачами, которые необходимо решить, значение для развития определенной отрасли науки или практической деятельности.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье без дополнительного обращения к другим литературным источникам. Во введении автор осуществляет обзор проблемной области (литературный обзор), в рамках которой осуществлено исследование, обозначает проблемы, не решенные в предыдущих исследованиях, которые призвана решить данная статья. Кроме этого, в нем выражается главная идея публикации, которая существенно отличается от современных представлений о проблеме, дополняет или углубляет уже известные подходы к ней; обращается внимание на введение в научное обращение новых фактов, выводов, рекомендаций, закономерностей. Цель статьи вытекает из постановки научной проблемы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ЛИТЕРАТУРНОГО ОБЗОРА

В Список литературы рекомендуется включать от 20 до 40 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы, интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.
2. Шелушин Ю.А., Макаров К.Н. Проблемы и перспективы гидравлического моделирования волновых процессов в искаженных масштабах // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.4

Список литературы на английском языке (reference) оформляется в соответствии с международным стандартом цитирования Vancouver — последовательный численный стиль: ссылки нумеруются по ходу их цитирования в тексте, таблицах и рисунках. ФИО авторов, название статьи на английском языке, наименование журнала, год выпуска; Том (выпуск): страницы.

Образец:

Reference

Названия публикаций, изданий и других элементов библиографического описания для не англоязычных материалов должны приводиться в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии).

Примеры оформления распространенных типов библиографических ссылок:

Книги до трех авторов: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Город издания, Издатель*, Год издания; Общее количество страниц.

Образец:

Todinov M. *Reliability and risk models*. 2nd ed. Wiley, 2015; 80.

Книги более трех авторов: Фамилии Инициалы авторов (первых шести) et al. Заголовок. Город издания, Издатель, Год издания; Общее количество страниц.

Статья в печатном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Год публикации; Том* (Выпуск): Страницы. DOI (при наличии — обязательно).

Образец:

Pupyrev E. Integrated solutions in storm sewer system. *Vestnik MGSU*. 2018; 13(5):651-659. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.5.651-659

Статья в электронном журнале: Фамилия (Фамилии) Инициалы авторов. Заголовок. Название журнала. Дата публикации [дата цитирования]; Том* (Выпуск): Страницы. URL.

Образец:

Chertes K., Tupitsyna O., Martynenko E., Pystin V. Disposal of solid waste into soil-like remediation and building. *Stroitel'stvo nauka i obrazovanie* [Internet]. 2017 [cited 24 July 2018]; 7(3):3-3. URL: http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2017/03/03_03_2017.pdf DOI: 10.22227/2305-5502.2017.3.3

Статья, размещенная на интернет-сайте: Фамилия (Фамилии) Инициалы автора (авторов)*. Название [Internet]. Город, Издатель*, Год издания [Дата последнего обновления*; дата цитирования]. URL

Образец: *How to make a robot* [Internet]. *Design Academy*. 2018 [cited 24 July 2018]. URL: <https://academy.autodesk.com/how-make-robot>

* указываются при наличии.

Все даты указываются в формате ДД-Месяц (текстом)-Год

Для формирования англоязычного списка литературы редакция рекомендует использовать ресурс Citethisforme.com.

ШАБЛОН СТАТЬИ

УДК 11111

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. В него необходимо как вложить информативность, так и отразить привлекательность, уникальность научного творчества автора.

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²...

¹ *Место работы первого автора; город, страна*

² *Место работы первого автора; город, страна*

Аннотация (должна содержать от 200 до 250 слов), в которую входит информация под заголовками: **Введение, Материалы и методы, Результаты, Выводы.**

Введение: приводятся характеристики работы — если не ясно из названия статьи, то кратко формулируются предмет исследования, его актуальность и научная новизна, а также практическая значимость (общественная и научная), цель и задачи исследования. Лаконичное указание проблем, на решение которых направлено исследование, или научная гипотеза исследования.

Материалы и методы: описание применяемых информационных материалов и научных методов.

Результаты: развернутое представление результатов исследования. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение.

Выводы: аргументированное обоснование ценности полученных результатов, рекомендации по их использованию и внедрению. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, новыми гипотезами, описанными в статье.

Приведенные части аннотации следует выделять соответствующими подзаголовками и излагать в данных разделах релевантную информацию. **См. рекомендации по составлению аннотации.**

Ключевые слова: 7–10 ключевых слов.

Ключевые слова являются поисковым образом научной статьи. Во всех библиографических базах данных возможен поиск статей по ключевым словам. В связи с этим они должны отражать основную терминологию научного исследования и не повторять название статьи.

Благодарности (если нужно).

В этом разделе следует упомянуть людей, помогавших автору подготовить настоящую статью, организации, оказавшие финансовую поддержку. Хорошим тоном считается выражение благодарности анонимным рецензентам.

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

И.О. Фамилия¹, И.О. Фамилия²... на английском языке

¹ *Место работы первого автора; город, страна – на английском языке*

² *Место работы первого автора; город, страна – на английском языке*

Abstract (200–250 слов)

Introduction: text, text, text.

Materials and methods: text, text, text.

Results: text, text, text.

Conclusions: text, text, text.

Key words: text, text, text.

Acknowledgements: text, text, text.

ВВЕДЕНИЕ

Задача введения — обзор современного состояния рассматриваемой в статье проблематики, обозначение научной проблемы и ее актуальности.

Введение должно включать обзор современных оригинальных российских и зарубежных научных достижений в рассматриваемой предметной области, исследований и результатов, на которых базируется

представляемая работа (Литературный обзор). Литературный обзор должен подчеркивать актуальность и новизну рассматриваемых в исследовании вопросов.

Во введении должна содержаться информация, которая позволит читателю понять и оценить результаты исследования, представленного в статье.

Литературный обзор. Список источников включает от 20 до 50 источников, не учитывая ссылки на нормативные документы (ГОСТ, СНИП, СП), интернет-ресурсы (сайты сети Интернет, не являющиеся периодическими изданиями), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники следует указывать в списке литературы сверх минимально установленного порога. Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия.

Уровень публикации определяют полнота и представительность источников. Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования:

- Web of Science <http://webofknowledge.com>
- Scopus <http://www.scopus.com/home.url>
- ядро Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) <http://elibrary.ru>

Англоязычных источников включают в список не менее 50 %, за последние три года — не менее половины. Рекомендуется использовать оригинальные источники не старше 10 лет.

Ссылки на источники приводятся в статье в квадратных скобках. Источники нумеруются по порядку упоминания в статье.

Завершают введение к статье постановка и описание цели и задачи приведенной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Раздел описывает методику проведения исследования. Обоснование выбора темы (названия) статьи. Сведения о методе, приведенные в разделе, должны быть достаточными для воспроизведения его квалифицированным исследователем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой части статьи должен быть представлен систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать так, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель которого — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты следует сопоставить с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей. Такое сравнение дополнительно раскроет новизну проведенной работы, придаст ей объективность. Результаты исследования должны быть изложены кратко, но при этом содержать достаточно информации для оценки сделанных выводов. Не принято в данном разделе приводить ссылки на литературные источники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Заключение содержит краткую формулировку результатов исследования (выводы). В этом разделе показывают, как полученные результаты обеспечивают выполнение поставленной цели исследования, указывают, что поставленные задачи авторами были решены. Приводятся обобщения и даются рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В рамках обсуждения желательно раскрыть перспективы развития темы.

В данном разделе не приводят ссылки на источники.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

Оформляется на русском и английском языках.

Расположение источников в списке – в строгом соответствии с порядком упоминания в тексте статьи.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТа Р 7.0.5–2008.

Библиографическое описание документов (в том числе и электронных) на английском языке оформляется в стиле «Ванкувер».

Русскоязычные источники необходимо приводить в официальном варианте перевода (т.е. том, который размещен в самом издании; при наличии). Название города издания приводится полностью, в английском написании. Названия журналов и издательств приводятся либо официальные английские (если есть), либо транслитерированные. В конце описания источника в скобках указывается язык источника (rus.).

Для изданий следует указать фамилии авторов, журнал (электронный адрес), год издания, том (выпуск), номер, страницы, DOI или адрес доступа в сети Интернет. Интересующийся читатель должен иметь возможность найти указанный литературный источник в максимально сжатые сроки.

Если у статьи (издания) есть DOI, его обязательно указывают в библиографическом описании источника.

Важно правильно оформить ссылку на источник.

Пример оформления:

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).

2. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р. Математическая модель теплопереноса в пористом теле // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. № 3. С. 35–53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3

REFERENCES

1. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46-50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (Accessed 19th June 2015). (rus.).

2. Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical model of heat and mass transfer in porous body. *Construction: science and education*. 2018; 8(3):35-53. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.3 (rus.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Оформляются на русском и английском языках.

Об авторах: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации; адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение, **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме, в именительном падеже), в которой работает (учится) автор, почтовый адрес организации, адрес электронной почты.

Сведения об авторах на английском языке приводятся в полном виде, без сокращений слов. Приводятся официально установленные англоязычные названия организаций и их подразделений. Опускаются элементы, характеризующие правовую форму учреждения (организации) в названиях вузов.

Автор должен придерживаться единообразного написания фамилии, имени, отчества во всех статьях. Эта информация для корректной индексации должна быть указана в других статьях, профилях автора в Международных базах данных Scopus / WoS и т.д.

Віонotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

УФК по г.Москве (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 4 4 5 2 5 0 0 0

КБК 0 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 2020 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 (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7 7 1 6 1 0 3 3 9 1

(ИНН получателя платежа)

4 0 5 0 1 8 1 0 8 4 5 2 5 2 0 0 0 0 7 9

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО

(наименование банка получателя платежа)

БИК 0 4 4 5 2 5 0 0 0

КБК 0 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 2020 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. 22-47), podpiska@mgsu.ru.

Подробную информацию о вариантах подписки на «Вестник МГСУ» для физических и юридических лиц смотрите на сайте журнала <http://vestnikmgsu.ru/>

