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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал
по строительству и архитектуре

Том 16 Выпуск 6/2021
Vol. Issue

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction
and Architecture

DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6

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

ВЕСТНИК МГСУ

Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

Том 16. Выпуск 6
2021

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

Сквозной номер 151

VESTNIK MGSU

Monthly Journal on Construction and Architecture

Volume 16. Issue 6
2021

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

ВЕСТНИК МГСУ
Научно-технический журнал по строительству и архитектуре

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

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

Тематические рубрики

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

Наименование органа, зарегистрировавшего издание:	Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-63119 от 18 сентября 2015 г.
ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Периодичность:	12 раз в год
Учредители:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26; Общество с ограниченной ответственностью «Издательство АСВ», 129337, Москва, Ярославское ш., д. 19, корп. 1.
Выходит при научно-информационной поддержке:	Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Международной общественной организации содействия строительному образованию — АСВ.
Издатель:	ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26. Сайт: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Типография:	Типография Издательства МИСИ – МГСУ 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8. Тел.: (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90
Сайт журнала:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	journals@mgsu.ru
Тел.:	(495) 287-49-14, доб. 23-93
Подписка и распространение:	Журнал распространяется бесплатно в открытом доступе и по подписке. Подписка по Объединенному каталогу «Пресса России». Подписной индекс 83989. Цена свободная.
Подписан в печать	28.06.2021.
Подписан в свет	30.06.2021.

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

Знаком информационной продукции не маркируется.

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2021

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

Выпускающий редактор: *Анна Александровна Дядичева*
Редактор: *Татьяна Владимировна Бердникова*
Корректор: *Любовь Владимировна Светличная*
Дизайн и верстка: *Алина Германовна Алейникова*
Перевод на английский язык: *Ольга Валерьевна Юденкова*

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

Председатель редакционного совета

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

Редакционный совет

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VESTNIK MGSU
Monthly Journal on Construction and Architecture

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

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

Thematic sections

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

ISSN	1997-0935 (Print) 2304-6600 (Online)
Publication Frequency:	Monthly
Founders:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337; Limited Liability Company "ASV Publishing House", 19, building 1 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337.
The Journal enjoys the academic and informational support provided by	The Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACS), International public organization of assistance to construction education (ASV)
Publisher:	Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 Website: www.mgsu.ru E-mail: journals@mgsu.ru
Printing House:	Printing house of the Publishing house MISI – MGSU building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, Russian Federation, 129337 tel. (499) 183-91-44, 183-67-92, 183-91-90.
Website journal:	http://vestnikmgsu.ru
E-mail:	vestnikmgsu@mgsu.ru, journals@mgsu.ru
Subscription:	Citizens of the CIS and other foreign countries can subscribe by catalog agency "Informnauka", magazine subscription index 18077.
Signed for printing:	28.06.2021

Distributed by subscription

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

Editor-in-Chief

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

Deputys Editor-in-Chief

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

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

Editorial Board

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

Piotr Banaszuk, Bialystok University of Technology, Republic of Poland

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Roode Liias, Tallin University of Technology, Estonia

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

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

Miroslav Premrov, University of Maribor, Republic of Slovenia

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

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

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

Josef Vichan, University of Zilina, Slovak Republic

Joost Walraven, Delft University of Technology, Netherlands

Zbigniew Wojcicki, Wroclaw University of Technology, Republic of Poland

Editorial team of issues

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

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

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

Chairman of the Editorial Board

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

Editorial Council

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

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

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, Scientifi c-research Institute of building physics Russian Federation Academy of architecture and construction Sciences, Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Oleg G. Primin, "MosVodoKanalNIIProekt" JSC, Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

Vladimir I. Travush, CJSC "Gorproject", Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

Чан Нгок Тьян, Нгуен Тхи Хань Фыонг, Е.В. Горбаренко
Оценка энергоэффективности оконной системы с солнцезащитным устройством П-образного типа 655

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

П.А. Акимов, М.Л. Мозгалева, Т.Б. Кайтуков
Вейвлет-реализация дискретно-континуального метода конечных элементов на основе B-сплайнов для локального расчета пластины 666

С.Г. Саиян, А.Г. Паушкин
Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок 675

СТРОИТЕЛЬНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.Н. Гуменюк, И.С. Полянских, С.М. Петрунин, Ф.Е. Шевченко, Г.Н. Первушин
Многофункциональный слоистый композиционный материал строительного назначения 688

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.Г. Первов , Т.Н. Ширкова, Д.В. Спицов
Экономические аспекты очистки фильтратов полигонов хранения твердых коммунальных отходов с применением мембран 698

Р.Ш. Мансуров, Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева
A theoretical and experimental study of transient characteristics of the heat exchange in a thermal control system (Теоретическое и экспериментальное исследование переходных характеристик теплообмена в системе терморегулирования) 720

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.А. Алиулова, М.В. Петроченко
Оценка качества проектной документации повторного использования 730

Д.М. Мазурин, М.Е. Дементьева
Технико-экономические показатели производства работ по демонтажу многоэтажного здания в условиях сложившейся застройки 741

О.В. Бахарева, Л.И. Ажимова, А. Челани, Н.С. Большаков
Институт общественной опеки: инвестиции в границах исторических поселений и жизненный цикл городской среды 751

БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

А.А. Ковригин, М.Ю. Слесарев
Модель изменения гидротехнических характеристик территории полигона твердых промышленных и бытовых отходов 770

Требования к оформлению научной статьи 781

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 16. Выпуск 5, 2021**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 16. Issue 5, 2021**

CONTENTS

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING. RECONSTRUCTION AND REFURBISHMENT

Tran Ngoc Chan, Nguyen Thi Khanh Phuong, Ekaterina V. Gorbarenko
Assessment of the energy efficiency of a window system with a shading device of the egg-crate type 655

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

Pavel A. Akimov, Marina L. Mozgaleva, Taymuraz B. Kaytukov
About the B-spline wavelet discrete-continual finite element method of the local plate analysis 666

Sergey G. Saiyan, Alexander G. Paushkin
The numerical parametric study of the stress-strain state of I-beams having versatile corrugated webs 675

CONSTRUCTION MATERIAL ENGINEERING

Alexander N. Gumeniuk, Irina S. Polyanskikh, Semen M. Petrunin, Filipp E. Shevchenko, Grigory N. Pervushin
Multifunctional layered composite material used for construction purposes 688

ENGINEERING SYSTEMS IN CONSTRUCTION

Alexey G. Pervov, Tatiana N. Shirkova, Dmitriy V. Spitsov
Economic aspects of landfill leachate treatment using reverse osmosis membranes. 698

Rustam Sh. Mansurov, Yuri E. Voskoboinikov, Vasilisa A. Boeva
A theoretical and experimental study of transient characteristics of the heat exchange in a thermal control system. . . . 720

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION. ECONOMICS AND MANAGEMENT IN CONSTRUCTION

Vladislava A. Aliulova, Marina V. Petrochenko
The quality assessment of reusable project documentation 730

Dmitry M. Mazurin, Marina E. Dement'eva
Dismantling a multi-storey building in the conditions of a built-up area: engineering and economic indicators . . . 741

Olga V. Bakhareva, Liliya I. Azhimova, A. Celani, Nicolai S. Bolshakov
Institution of public welfare: investments within historic settlements and the life cycle of the urban environment 751

SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN ECONOMY

Artur A. Kovrigin, Mikhail Yu. Slesarev
A change model of the hydraulic characteristics of the territory occupied by the landfill of solid industrial and domestic waste 770

Requirements for research paper design 781

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 5, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 5, 2021

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 applies 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 тему:
«Предельное состояние стальных структурных конструкций».
Конкурсный отбор состоится на заседании Научно-технического совета НИУ МГСУ **21.09.2021 г.** в **14:00.**
С порядком проведения конкурсного отбора можно ознакомиться на официальном сайте НИУ МГСУ (mgsu.ru).

УДК 628.47:004.94 DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.655-665

Оценка энергоэффективности оконной системы с солнцезащитным устройством П-образного типа

Чан Нгок Тьян[1], Нгуен Тхи Хань Фыонг[1], Е.В. Горбаренко[2]
[1] Национальный строительный университет; г. Ханой, Вьетнам;
[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Предложен новый метод оценки энергоэффективности на основе разработки методики расчетов теплопоступления через окна с учетом коэффициента снижения облученности рассеянной солнечной радиации (СР) солнцезащитным устройством. Исследование проведено для П-образного типа солнцезащитного устройства.

Материалы и методы. Расчеты основываются на проекции солнечного луча при расчете части площади окна в тени с учетом коэффициента снижения облученности рассеянной СР солнцезащитным устройством. Наличие солнцезащитных устройств на поверхности окна способствует снижению облученности рассеянной СР, которая представлена коэффициентом K_{bt}. При оценке энергоэффективности с учетом определения эффективности солнцезащитных устройств был разработан коэффициент уменьшения теплопоступления СР β, описывающийся отношением СР через остекленный световой проем при наличии солнцезащитного устройства Q_K к СР через остекленный световой проем без него Q_{Ko}. С помощью разработанной компьютерной программы проведены проверочные расчеты теплопоступления от СР через оконную систему с учетом солнцезащитного устройства в различных географических регионах в летний период (в Ханое и Москве).

Результаты. Сравнение результатов предлагаемой методики и данных наблюдения показывает незначительную разницу по относительному значению β и большую погрешность при учете абсолютного значения количества тепла, поступающего в помещение $q_{окно}$. В самый жаркий период года при наличии солнцезащитных устройств тепловая нагрузка через оконную систему уменьшается на 42–46 % для Москвы; 48–63 % для Ханоя.

Выводы. Предложенные методика и компьютерная программа для быстрой оценки энергоэффективности оконной системы при наличии солнцезащитных устройств с учетом коэффициента уменьшения теплопоступления СР β через оконную систему позволяют производить проектирование ограждающих конструкций зданий с высокой эффективностью в энергосбережении для систем кондиционирования воздуха.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: энергоэффективность зданий, расчет солнцезащитного устройства, солнцезащитное устройство П-образного типа, теплопоступление, расчет солнечной радиации, коэффициент облученности, оконная система

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Чан Нгок Тьян, Нгуен Тхи Хань Фыонг, Горбаренко Е.В.* Оценка энергоэффективности оконной системы с солнцезащитным устройством П-образного типа // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 6. С. 655–665. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.655-665

Assessment of the energy efficiency of a window system with a shading device of the egg-crate type

Tran Ngoc Chan[1], Nguyen Thi Khanh Phuong[1], Ekaterina V. Gorbarenko[2]
[1] National University of Civil Engineering (NUCE); Hanoi, Vietnam;
[2] Lomonosov Moscow State University (MSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article proposes a new energy efficiency assessment method based on a new technique used to calculate the window heat gain. The proposed method takes account of the coefficient of irradiance reduction by the sun shading device. The study was carried out for the shading device of the egg-crate type.

Materials and methods. Calculations are based on the projection of a sunbeam performed for a fraction of a window area in the shade. They take account of the coefficient of irradiance reduction applied due to the presence of the sun shading device. A shading device reduces the irradiance, caused by diffused solar radiation, and coefficient K_{bt} is applied to demonstrate this process. This coefficient was identified in an experiment and expressed in the form of regression equations.
To evaluate the energy efficiency with regard for the effectiveness of shading devices, coefficient of solar radiation gain reduction β was developed. This coefficient is described by the ratio of the value of solar radiation incoming through a glazed window in the presence of shading device Q_K to the value of solar radiation incoming through a glazed window that has no shading Q_{Ko}. The software programme was used to verify the calculations of the heat gain from the solar radiation incoming through the window system with regard for the shading device in various geographical regions in summer (in Hanoi and Moscow).

Results. The results, obtained using the proposed methodology and the observation data, show an insignificant difference

© Чан Нгок Тьян, Нгуен Тхи Хань Фыонг, Е.В. Горбаренко, 2021
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

in the relative value of β; and they demonstrate a major error when q_{window}, or the absolute value of heat entering the room, is taken account of. The heat load, incoming through the window system, is down by 42–45 % in Moscow and by 45–53 % in Hanoi in the hottest period of the year if shading devices are used.

Conclusions. The proposed methodology and computer software, used for a quick assessment of the energy efficiency of a window system equipped with shading devices, allow to design building envelopes that feature high energy efficiency in terms of air conditioning systems, given that coefficient of radiation gain reduction β is taken account of.

KEYWORDS: energy efficiency of buildings, analysis of a shading device, shading device of the egg-crate type, heat gain, solar radiation analysis, irradiance coefficient, window system

FOR CITATION: Tran Ngoc Chan, Nguyen Thi Khanh Phuong, Gorbarenko E.V. Assessment of the energy efficiency of a window system with a shading device of the egg-crate type. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(6):655-665. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.655-665 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором, влияющим на энергосбережение, являются теплопоступления от солнечной радиации (СР). В различных географических регионах максимальная интенсивность СР в летний период может достигать до 352–390 Вт/м^2. В этот период существенно увеличивается энергопотребление за счет работы систем кондиционирования воздуха в зданиях. Наличие солнцезащитных устройств способствует снижению риска энергопотребления за счет уменьшения теплопоступления от СР через оконное остекление [1–5].

При проектировании солнцезащитных устройств зданий необходимо учитывать геометрию конструкций, связанную с изменением положения солнца, чтобы определить время и количество прямого солнечного излучения, проникающего через затененные окна [6–8]. Самый современный метод расчета охлаждающей нагрузки — метод радиантных временных рядов (Radiant Time Series Method — RTS) [9, 10], который подходит для расчетов пиковой охлаждающей нагрузки. Метод RTS обладает рядом преимуществ по сравнению с большинством известных методов. Он позволяет рассчитать ежечасное теплопоступление от притока передаваемой прямой и рассеянной СР для окон любой ориентации.

В строительных нормах и правилах многих тропических стран, в таких азиатских странах, как Сингапур, Гонконг, Филиппины, Индонезия, Малайзия, Таиланд и в Центральной Америке (Ямайка и Кот-д'Ивуар), общее значение теплопередачи — OTTV (Overall Thermal Transfer Value) используется в качестве меры контроля при проектировании ограждающих конструкций зданий [11].

В России В.Н. Богословский и Фам Нгок-Данг опубликовали метод расчета теплопоступления от СР через окна с учетом затеняющего устройства. Этот метод также учитывает общее тепло, передаваемое в комнату через окна, принимая во внимание следующие показатели: прямое излучение q_s; диффузное излучение q_D; тепло, излучаемое от земли $q_{зем}$; лучистое тепло от окружающих зданий $q_{эл}$; тепло от длинноволнового диффузного излучения окружающей среды $q_{дл}$. Метод одновременно принимает в расчет тепло, поглощаемое оконным стеклом $q_{пог}$, и тепло, передаваемое в здание, которое формируется за счет разницы внутреннего и наружного воздуха $q\Delta t$, а также воздействие затеняющих устройств, таких как жалюзи и экранирование [12].

Во Вьетнаме в строительстве общественных и гражданских зданий используют различные типы солнцезащитных устройств. В приложении «Расчет солнцезащитных устройств», разработанном автором для дополнения к нормативному документу QCVN 09:2017 для Вьетнама[1], рассматриваются различные типы солнцезащитных устройств. В настоящей статье предложен метод расчета устройства П-образного типа солнечного затенения и определяется количество теплоты, поступающей в помещение от солнечной радиации через окно, с этим солнцезащитным устройством. Проведено сравнение поступающей СР по расчетным данным и многолетним наблюдениям.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Схема солнцезащитного устройства П-образного типа

Солнцезащитное устройство П-образного типа состоит из верхнего и двух боковых ребер (рис. 1).

Принцип расчета

Расчет всех типов солнцезащитных устройств основывается на проекции солнечного луча, проходящего через край солнцезащитного ребра и точки его прикосновения *M* на поверхности заполнения светового проема на определенной ориентации (рис. 2).

Координаты *x*, *y* точки прикосновения *M* солнечного луча на поверхности окна определяются следующими формулами[2] [13]:

$$\tan\Omega = \frac{\tan h}{\cos\gamma}, \quad (1)$$

$$x = b\left|\tan\gamma\right|, \quad (2)$$

$$y = b\tan\Omega, \quad (3)$$

где *b* — ширина ребра солнечного затенения, м; *h*, γ, Ω — последовательно высота солнца, азимут солн-

[1] QCVN 09:2017/BXD. Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về Các công trình xây dựng sử dụng năng lượng hiệu quả. BXD. 30tr. 2017 [QCVN 09:2017/BXD. National Technical Code for Building Energy Efficiency. MoC. 30 C. 2017].

[2] ASHRAE. Handbook Fundamentals. 2005.

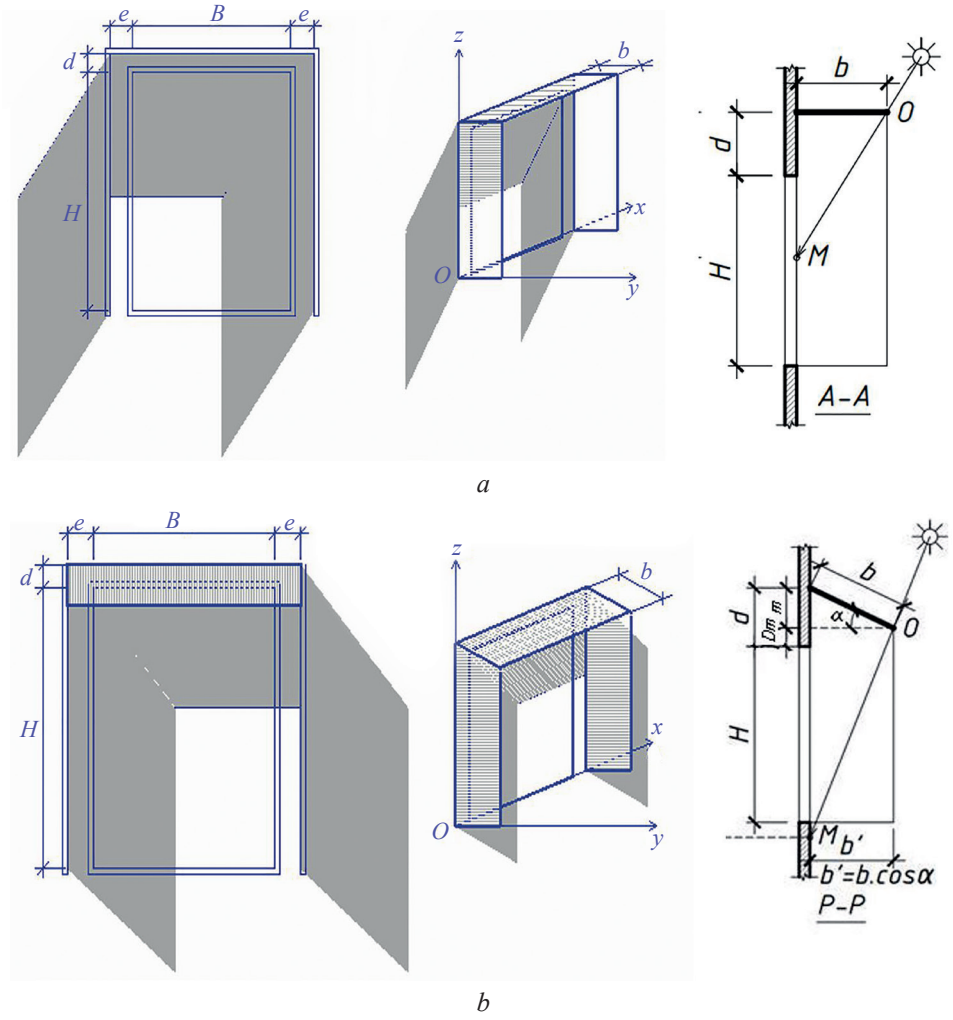


Рис. 1. Схема солнцезащитного устройства П-образного типа: *a* — верхнее ребро устанавливается перпендикулярно к стене α = 0; *b* — верхнее ребро составляет с горизонтальной поверхностью угол α > 0

Fig. 1. A sun shading device of the egg-crate type: *a* — the upper rib is installed perpendicularly to wall α = 0; *b* — the upper rib makes angle α > 0 with the horizontal surface

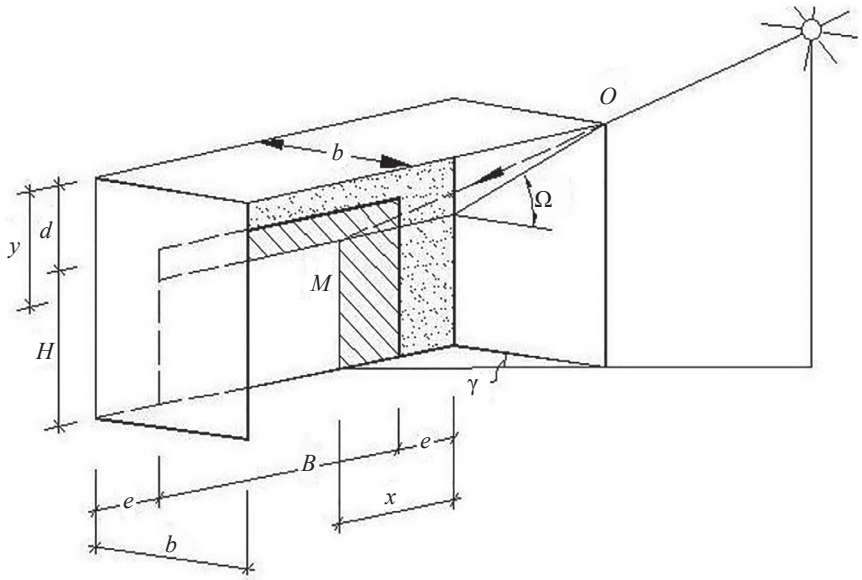


Рис. 2. Изображение луча солнца, проходящего через край *O* солнцезащитного устройства П-образного типа и углы γ и Ω

Fig. 2. The sun ray passing through edge *O* of the shading device of the egg-crate type; angles γ and Ω

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6. 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6. 2021

ца-стены и угол боковой проекции солнечного луча в градусах; x, y — координаты точки прикосновения солнечного луча на поверхности окна M, м (рис. 2).

Принцип расчета подробно изложен в работах[3] [14].

Определение коэффициента облученности G

При наличии солнцезащитного устройства часть поверхности окна $A_{обл}$ подвергается облучению суммарной (прямой и рассеянной) радиацией, остальная часть находится в тени, куда СР поступает в виде рассеянного потока. Коэффициентом облученности G является соотношение:

$$G = \frac{A_{обл}}{A_{ос}} = 1 - \frac{A_{тени}}{BH}, \quad (4)$$

где $A_{обл}$ — площадь солнечной облученности, м^2; $A_{тени}$ — часть площади окна в тени (часть поверхности окна со штрихами на рис. 2), м^2; $A_{ос} = BH$ — площадь остекления, м^2; B, H — ширина и высота окна, м.

Ниже приведены формулы для расчета части площади окна в инсоляции A_e и коэффициента облученности G. Пусть:

$$R = \frac{b}{H},\ R_e = \frac{e}{B},\ R_b = \frac{b}{B},\ R_d = \frac{d}{H}, \quad (5)$$

где b — ширина верхнего солнцезащитного ребра, м; d — расстояние от верхнего края окна до верхнего солнцезащитного ребра, м; e — расстояние от бокового края окна до вертикальных солнцезащитных ребер, м.

Часть поверхности окна, площадь которой подвергается инсоляции A_e зависит от координат x и y, определенных по формулам (1)–(3).

Используя эти соотношения, получаем формулы для расчета величин A_e и G.

При $x \le e$ и $y \le d$; $A_e = BH$:

$$G = 1. \quad (6)$$

Если $e < x < B + e$ и $d < y < H + d$; $A_e = (B + e - x)(H + d - y)$:

$$G = \left(1 + R_e - R_b\left|\tan\gamma\right|\right)\left(1 + R_d - R\tan\Omega\right). \quad (7)$$

В случае $x \le e$ и $y > d$; $A_e = B\,(H + d - y\,)$:

$$G = 1 + R_d - R\tan\Omega. \quad (8)$$

При $x > e$ и $y \le d$; $A_e = (B + e - x)H$:

$$G = 1 + R_e - R_b\left|\tan\gamma\right|. \quad (9)$$

Когда $x \ge B + e$ или $y \ge H + d$: $A_e = 0$:

$$G = 0. \quad (10)$$

Коэффициент снижения облученности рассеянной солнечной радиации солнцезащитным устройством П-образного типа K_{bt}

При наличии солнцезащитных устройств на поверхности окна $A_{ос}$ воздействует диффузное излучение I_D с коэффициентом снижения облученности рассеянной СР K_{bt}.

Согласно работе [13] коэффициент K_{bt} для непрерывного горизонтального и вертикального солнцезащитных устройств зависит от «телесного угла неба»: δ и t определены по табл. 1 и рис. 3.

Пусть $D_m = b\sin\alpha$, получим:

$$\delta = \text{ar}\tan\left(\frac{b\cos\alpha}{H + d - D_m}\right), \text{ град}, \quad (11)$$

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau = \text{ar}\tan\left(\frac{b\cos\alpha}{B + e}\right), \text{ град}, \quad (12)$$

Используя данные табл. 2, получаем следующие регрессионные уравнения:

$$K_1 = 2{,}10^{-5}\delta^2 - 0{,}015\,\delta + 0{,}983, \quad (13)$$

$$K_2 = 2{,}10^{-5}\tau^2 - 0{,}007\,\tau + 0{,}992, \quad (14)$$

$$K_{bt} = K_1\,K_2. \quad (15)$$

[3] Пособие 2.91 к СНиП 2.04.05-91. Расчет поступления теплоты солнечной радиации в помещение. М. : Стройиздат, 1993. 45 с.

Табл. 1. Коэффициент K_{bt} для непрерывного горизонтального и вертикального солнцезащитных устройств

Table 1. Coefficient K_{bt} for continuous horizontal and vertical shading devices

№	Тип солнцезащитных устройств Types of shading devices	Телесный угол неба δ или τ_1, град Solid angle δ or τ_1, degrees					
		10	20	30	40	50	60
1	Коэффициент K_{bt}^{hor} для непрерывного горизонтального солнцезащитного устройства, перпендикулярного к поверхности стены Coefficient K_{bt}^{hor} for a continuous horizontal shading device, which is perpendicular to the wall surface	0,84	0,70	0,58	0,47	0,36	0,27
2	Коэффициент K_{bt}^{ver} для непрерывного вертикального солнцезащитного устройства, перпендикулярного к поверхности стены Coefficient K_{bt}^{ver} for a continuous vertical shading device, which is perpendicular to the wall surface	0,92	0,85	0,79	0,73	0,68	0,63

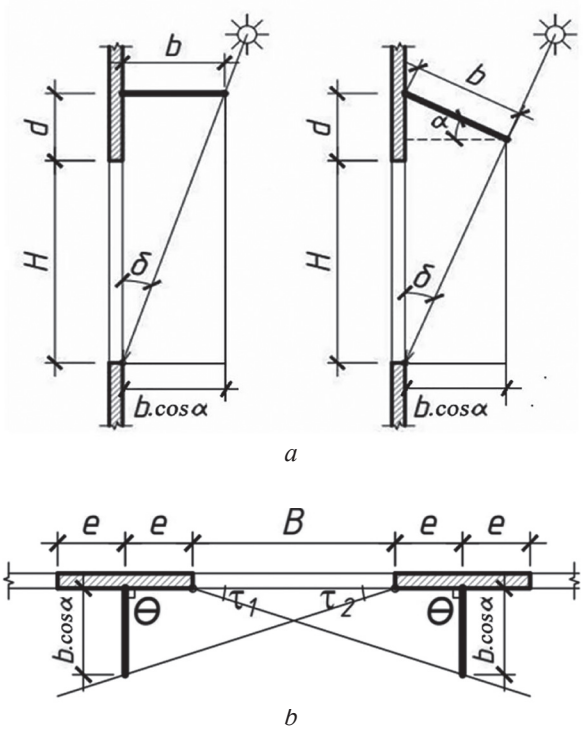


Рис. 3. Углы δ и τ_1, τ_2, образованные солнцезащитным устройством П-образного типа: *a* — для верхнего ребра; *b* — для боковых ребер

Fig. 3. Angles δ and τ_1, τ_2, formed by the shading device of the egg-crate type: *a* — for the upper rib; *b* — for side ribs

Коэффициент уменьшения теплопоступления солнечной радиации через световой проем благодаря солнцезащитному устройству β

Теплопоступление от СР через световой проем при отсутствии солнцезащитного устройства определяется следующей формулой[3]:

$$Q_{K0} = \left(q_{\text{п}} + q_{\text{р}}\right) SHGC\, A_{\text{ос}}, \text{Вт}, \qquad (16)$$

где $q_{\text{п}}$ и $q_{\text{р}}$ — последовательно интенсивность прямой и рассеянной СР, поступающей на поверхность остекленного светового проема, Вт/м^2; *SHGC* — коэффициент получения тепла от СР оконным стеклом, без размера; $A_{\text{ос}}$ — площадь остекления, м^2.

При наличии солнцезащитного устройства теплопоступление от СР через остекленный световой проем Q_K определяется по следующим формулам[4] [14–16]:

$$Q_K = SHGC\left(q_{\text{п}} A_{\text{обл}} + K_{\text{bt}} q_{\text{р}} A_{\text{ос}}\right), \text{ Вт}. \qquad (17)$$

Обозначая β отношение Q_K к Q_{Ko}, как коэффициент уменьшения теплопоступления СР через остекление, с учетом выражения (4), имеем:

$$\beta = \frac{Gq_{\text{п}} + K_{bt} q_{\text{р}}}{q_{\text{п}} + q_{\text{р}}} = \frac{Gq_{\text{п}} + K_{bt} q_{\text{р}}}{q_{\text{о}}}, \qquad (18)$$

где $q_{\text{о}} = q_{\text{п}} + q_{\text{р}}$ — интенсивность суммарной СР, Вт/м^2.

С учетом коэффициента β выражение (16) может быть переписано следующим образом (при отсутствии солнцезащитного устройства, β = 1):

$$Q_K = \left(q_{\text{п}} + q_{\text{р}}\right) SHGC\, \beta\, A_{\text{ос}}, \text{ Вт}. \qquad (19)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Таким образом, основа расчета солнцезащитных устройств заключается в определении их коэффициентов *G* и β.

Солнечная радиация

Для расчета коэффициента β и количества тепла Q_K необходимо установить интенсивность суммарной и рассеянной СР. В работе были использованы два источника данных о СР: 1 — расчетные сведения, полученные по методу ASHRAE (Американская Ассоциация инженеров по отоплению, охлаждению и кондиционированию воздуха); 2 — данные измерений, проводимых в Ханое и метеорологической обсерватории МГУ в Москве[5] [11, 17].

В табл. 2 приведены значения интенсивности СР, поступающей на вертикальную поверхность юго-восточной экспозиции в июле, измеренные и полученные путем расчета.

Создание программы для оценки эффективности солнцезащитного устройства П-образного типа

Для удобства использования вышеописанного метода, при проектировании энергоэффективных солнцезащитных устройств была разработана компьютерная программа. Программное обеспечение работает в WEB-среде, позволяя пользователям получать доступ к интернету. Программа дает возможность смоделировать эффективность затенения солнцезащитного устройства; быстро произвести расчет теплопоступлений от СР, поступающей через окно при наличии солнцезащитного устройства; рассчитать коэффициент уменьшения теплопоступления от СР. В качестве примера по предложенной программе для некоторых конкретных случаев по расчетным и измеренным данным интенсивности СР произведены расчеты.

Дано солнцезащитное устройство П-образного типа, устанавливается для окон шириной *B* = 2,6 м;

[4] Trần Ngọc Trấn và cộng sự. Phụ lục "Hướng dẫn tính chỉ số công trình OTTV" để bổ sung cho Quy chuẩn QCVN 09: 2017 / BXD. Đề tài nghiên cứu. Hà Nội. 2004. Tr 28-30 [Чан Нгок Тьян и др. Приложение «Руководство по расчету индекса OTTV зданий» для дополнения к Стандарту QCVN 09:2017/BXD. Тема научно-исследовательских работ. Ханой. 2004. С. 28–30 (на вьетнамском языке)].

[5] Trần Ngọc Trấn và cộng sự. Phụ lục "Hướng dẫn tính chỉ số công trình OTTV" để bổ sung cho Quy chuẩn QCVN 09: 2017 / BXD. Đề tài nghiên cứu. Hà Nội. 2004. Tr 28-30 [*Чан Нгок Тьян и др.* Приложение «Руководство по расчету индекса OTTV зданий» для дополнения к Стандарту QCVN 09:2017/BXD. Тема научно-исследовательских работ. Ханой. 2004. С. 28–30 (на вьетнамском языке)].

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

Табл. 2. Интенсивность СР, поступающей на фасад юго-восточной экспозиции в июле в Ханое и Москве

Table 2. The intensity of solar radiation entering the southeast facade in July in Hanoi and Moscow

Время, ч Time, hours	Ханой / Hanoi				Москва / Moscow			
	Интенсивность СР, Вт/м², по расчету Calculated solar radiation intensity, W/m²		Интенсивность СР, Вт/м², по измерениям Measured solar radiation intensity, W/m²		Интенсивность СР, Вт/м², по расчету Calculated solar radiation intensity, W/m²		Интенсивность СР, Вт/м², по измерениям Measured solar radiation intensity, W/m²	
	Суммарной Total	Прямой Direct	Суммарной Total	Прямой Direct	Суммарной Total	Прямой Direct	Суммарной Total	Прямой Direct
6	136,70	107,56	80,00	34,10	377,13	302,04	151,70	103,09
7	383,29	302,11	213,50	93,30	557,90	454,23	259,72	181,94
8	463,48	361,13	309,30	133,60	676,49	553,39	348,38	240,05
9	453,76	343,65	352,00	144,20	724,84	591,69	405,10	264,82
10	379,05	269,45	339,50	122,50	702,14	568,08	410,75	248,25
11	255,71	151,94	280,40	72,20	613,84	486,72	375,92	196,75
12	99,66	4,67	190,30	2,20	470,99	356,42	329,32	137,65
13	85,20	0,00	163,30	0,00	289,33	190,11	263,03	71,36
14	77,59	0,00	143,10	0,00	88,09	4,39	182,18	1,62
15	71,64	0,00	125,70	0,00	67,76	0,00	165,28	0,00
16	62,56	0,00	100,90	0,00	62,01	0,00	141,67	0,00
17	47,95	0,00	68,10	0,00	53,91	0,00	113,89	0,00
18	17,20	0,00	26,70	0,00	42,09	0,00	83,33	0,00
Сумма Total	2533,79	1540,51	2392,80	602,10	4726,52	3507,06	3212,27	1445,53
Средний в день Daily average	194,91	118,50	184,06	46,32	363,58	269,77	247,10	111,19

высотой $H = 3{,}5$ м; верхнее ребро шириной $b = 1{,}2$ м; расстояние от верхнего края окна до верхнего ребра $d = 0{,}35$ м; расстояние от бокового края окна до бокового ребра $e = 0{,}4$ м; угол наклона верхнего ребра к горизонтальной поверхности $\alpha = 25$ градусов.

Место строительства: Ханой (21° с.ш.) и Москва (56° с.ш.).

Месяц, число: 21 июля. Ориентация окон: юго-восточная.

Для примера ниже показаны только результаты расчета в 7 и 11 ч (рис. 4, 5). Программа дает результат расчетов суточного хода СР в виде рисунка с тенью на поверхности окна и стены.

Оценка теплопоступления от солнечной радиации через окно с предложенным солнцезащитным устройством

Количество теплопоступлений от СР $q_{\text{окно}}$, поступающей через 1 м² светового проема, определяется следующей формулой:

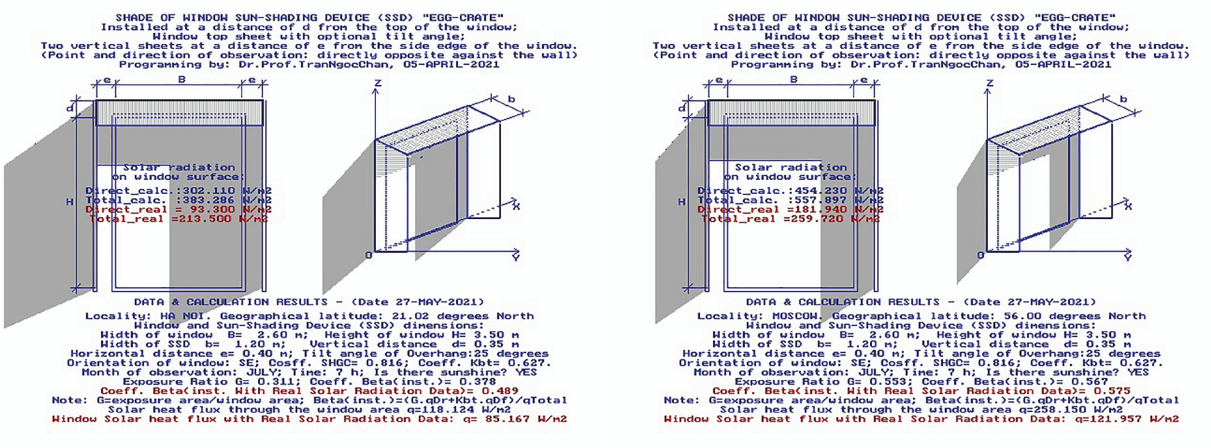
$$q_{\text{окно}} = SHGC\ \beta\ q_0,\ \text{Вт/м}^2, \qquad (20)$$

где $SHGC = 0{,}861$ — коэффициент теплопроницания обыкновенного стекла толщиной 6 мм; q_0 — интенсивность суммарной радиации, Вт/м²; β — коэффициент уменьшения теплопоступления СР через остекление за счет солнцезащитного устройства. При отсутствии солнцезащитного устройства $\beta = 1$.

Ниже представлены полные результаты расчетов влияния солнцезащитного устройства данного типа на теплопоступление в помещение от СР через световой проем для Ханоя и Москвы в июле (табл. 3, 4). Световой проем ориентирован на юго-восток.

Из рис. 4, *a*, *b* видно, что в 7 ч 21 июля тени солнцезащитного устройства в обоих случаях (в Ханое и в Москве) падают на левую сторону и занимают только часть поверхности окон, причем в Ханое коэффициент облученности G намного ниже, чем в Москве ($G_{\text{Ханой}} = 0{,}311$ и $G_{\text{Москва}} = 0{,}553$).

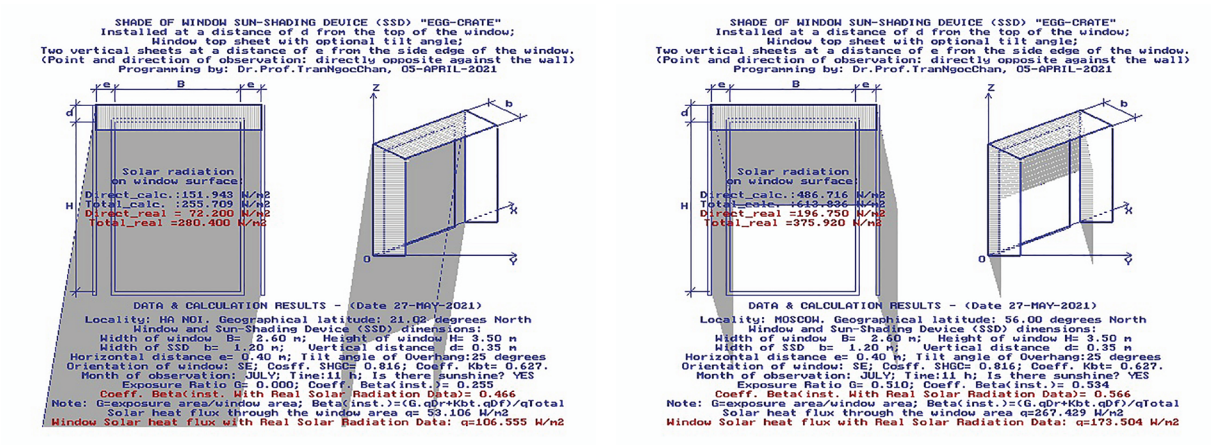
Из рис. 5, *a*, *b* следует, что в 11 ч 21 июля тень солнцезащитного устройства в Ханое падает на левую сторону и покрывает всю поверхность окна,



a *b*

Рис. 4. Тень солнцезащитного устройства П-образного типа на поверхности окна юго-восточной ориентации в 7 ч 21 июля: *a* — для Ханоя; *b* — для Москвы

Fig. 4. The shade of a shading device of the egg-crate type on the surface of a southeast-facing window July 21 at 07:00: *a* — in Hanoi; *b* — in Moscow



a *b*

Рис. 5. Тень солнцезащитного устройства П-образного типа на поверхности окна юго-восточной ориентации в 11 ч 21 июля: *a* — для Ханоя; *b* — для Москвы

Fig. 5. The shade of a shading device of the egg-crate type on the surface of a southeast-facing window July 21 at 11:00: *a* — in Hanoi; *b* — in Moscow

что дает $G_{\text{Ханой}} = 0$; а в Москве она падает на правую сторону и занимает часть поверхности окна $G_{\text{Москва}} = 0{,}510$. Это значит, что такое солнцезащитное устройство более эффективно для Ханоя, чем для Москвы.

Для Вьетнама среднее значение $q_{\text{окно}}$ в день при $q_{\text{СР – расчет}}$ ниже, чем при $q_{\text{СР – измерения}}$: результаты соответственно 59,10 и 77,74 Вт/м^2 (табл. 3). Для Москвы среднее значение $q_{\text{окно}}$ в день при $q_{\text{СР – расчет}}$ выше, чем при $q_{\text{СР – измерения}}$: результаты соответственно 161,15 и 117,80 Вт/м^2 (табл. 4).

В ходе выполнения работы сделаны следующие выводы:

• Проведенное сравнение в двух различных географических регионах показало необходимость учета режима СР региона при выборе солнцезащитного устройства. Чтобы получить наилучшие результаты, необходимо спроектировать солнцезащитное устройство с рациональными формой и размером на основе солнечной карты каждого города.

• Сравнение эффективности солнцезащитного устройства (табл. 3, 4) по теоретическим расчетам и по данным наблюдений показывает незначительную разницу по относительному значению β и большую погрешность при учете абсолютного значения количества тепла, поступающего в помещение в жаркое время года $q_{\text{окно}}$: для Ханоя составляет (–24) %, для Москвы (+36,8) %.

• Результаты показывают, что при наличии солнцезащитных устройств тепловая нагрузка через оконную систему уменьшается на 42–46 % для Москвы; 48–63 % для Ханоя.

Табл. 3. Коэффициент β и количество теплоты от солнечной радиации, поступающей в помещение через 1 м² светового проема в течение дня в июле для Ханоя

Table 3. The β coefficient and the amount of heat of solar radiation entering the room through 1 m² of the opening during the day in July for Hanoi

Время, ч Time, hour	Коэффициент облученности G Irradiance coefficient G	β при $q_{СР-расчет}$ β if $q_{average\ is\ calculated}$	β при $q_{СР-измерения}$ β if $q_{average\ is\ measured}$	Наличие инсоляции Insolation	$q_{окно}$ через 1 м² окна при $q_{СР-расчет}$, Вт/м² q_{window} through one m² of a window if $q_{average\ is\ calculated}$, W/m²	$q_{окно}$ через 1 м² окна при $q_{СР-измерения}$, Вт/м² q_{window} through one m² of a window if $q_{average\ is\ measured}$, W/m²
6	0,245	0,326	0,464	Да / Yes	36,39	30,30
7	0,311	0,378	0,489	Да / Yes	118,12	85,17
8	0,304	0,375	0,488	Да / Yes	141,92	123,04
9	0,230	0,327	0,465	Да / Yes	120,90	133,44
10	0,035	0,207	0,414	Да / Yes	63,88	114,60
11	0,000	0,255	0,466	Да / Yes	53,11	106,55
12	0,000	0,598	0,620	Да / Yes	48,62	96,27
13	0,000	0,627	0,627	Нет / No	43,60	83,58
14	0,000	0,627	0,627	Нет / No	39,71	73,24
15	0,000	0,627	0,627	Нет / No	36,67	64,33
16	0,000	0,627	0,627	Нет / No	32,02	51,64
17	0,000	0,627	0,627	Нет / No	24,54	34,85
18	0,000	0,627	0,627	Нет / No	8,80	13,66
Средние суточные Daily average		0,479	0,551	—	59,10	77,74

Табл. 4. Коэффициент β и количество теплоты от солнечной радиации, поступающей в помещение через 1 м² светового проема в течение дня в июле для Москвы

Table 4. The β coefficient and the amount of heat of solar radiation entering the room through 1 m² of the opening during the day in July for Moscow

Время, ч Time, hour	Коэффициент облученности G Irradiance coefficient G	β при $q_{СР-расчет}$ β if $q_{average\ is\ calculated}$	β при $q_{СР-измерения}$ β if $q_{average\ is\ measured}$	Наличие инсоляции Insolation	$q_{окно}$ через 1 м² окна при $q_{СР-расчет}$, Вт/м² q_{window} through one m² of a window if $q_{average\ is\ calculated}$, W/m²	$q_{окно}$ через 1 м² окна при $q_{СР-измерения}$, Вт/м² q_{window} through one m² of a window if $q_{average\ is\ measured}$, W/m²
6	0,401	0,446	0,473	Да / Yes	137,25	58,61
7	0,553	0,567	0,575	Да / Yes	258,15	121,96
8	0,638	0,636	0,634	Да / Yes	350,99	180,37
9	0,668	0,661	0,654	Да / Yes	390,79	216,20
10	0,608	0,612	0,616	Да / Yes	350,48	206,34
11	0,510	0,534	0,566	Да / Yes	267,43	173,50
12	0,248	0,340	0,469	Да / Yes	130,68	125,92
13	0,000	0,215	0,457	Да / Yes	50,78	98,10
14	0,000	0,596	0,622	Да / Yes	42,84	92,41
15	0,000	0,627	0,627	Нет / No	34,68	84,59
16	0,000	0,627	0,627	Нет / No	31,74	72,51

Окончание табл. 4

Время, ч Time, hour	Коэффициент облученности G Irradiance coefficient G	β при $q_{СР-расчет}$ β if $q_{average\ is\ calculated}$	β при $q_{СР-измерения}$ β if $q_{average\ is\ measured}$	Наличие инсоляции Insolation	$q_{окно}$ через 1 м² окна при $q_{СР-расчет}$, Вт/м² q_{window} through one m² of a window if $q_{average\ is\ calculated}$, W/m²	$q_{окно}$ через 1 м² окна при $q_{СР-измерения}$, Вт/м² q_{window} through one m² of a window if $q_{average\ is\ measured}$, W/m²
17	0,000	0,627	0,627	Нет / No	27,59	58,29
18	0,000	0,627	0,627	Нет / No	21,54	42,65
Средние суточные Daily average		0,547	0,583	—	161,15	117,80

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По итогам исследования:

• предложен новый метод оценки энергоэффективности на основе расчета теплопоступления через окна с солнцезащитным устройством. Вклад авторов заключается в разработке методики расчета коэффициента уменьшения теплопоступления СР β через оконную систему с учетом коэффициента снижения облученности рассеянной СР;

• показано, что солнцезащитное устройство П-образного типа, благодаря наличию вертикальных ребер на обеих сторонах окна, эффективно для затенения окон. Теплопоступление от СР уменьшается приблизительно на 40–60 % в разных климатических регионах;

• разработана программа расчета различных типов солнцезащитных устройств, что стало дополнением к нормативному документу QCVN 09:2017/BXD «Эффективное экономическое использование энергии в строительных сооружениях». С помощью предложенной программы возможно производить быстрое и точное проектирование солнцезащитных устройств с высокой эффективностью в энергосбережении для систем кондиционирования воздуха;

• проведена оценка энергоэффективности через расчеты теплопоступления от СР в различных климатических зонах (Ханой, Москва). Определено, что при проектировании солнцезащитных устройств необходимо учитывать региональные особенности радиационного режима.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Стецкий С.В., Ходейр В.А.* Эффективные солнцезащитные устройства в гражданском строительстве регионов с жарким солнечным климатом // Вестник МГСУ. 2012. № 7. С. 9–15.

2. *Carletti C., Sciurpi F., Pierangioli L.* The energy upgrading of existing buildings: Window and shading device typologies for energy efficiency refurbishment // Sustainability. 2014. Vol. 6. Issue 8. Pp. 5354–5377. DOI: 10.3390/su6085354

3. *Chua K.J., Chou S.K.* Evaluating the performance of shading devices and glazing types to promote energy efficiency of residential buildings // Building Simulation. 2010. Vol. 3. Issue 3. Pp. 181–194. DOI: 10.1007/s12273-010-0007-2

4. *Bianco L., Vigna I., Serra V.* Energy assessment of a novel dynamic PCMs based solar shading: results from an experimental campaign // Energy and Buildings. 2017. Vol. 150. Pp. 608–624. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.05.067

5. *Тамразян А.Г.* Основные принципы оценки риска при проектировании зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2011. № 2–1. С. 21–27.

6. *Hosseini S.M., Mohammadi M., Guerra-Santin O.* Interactive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by 2D and 3D shape changes // Building and Environment. 2019. Vol. 165. Pp. 106396. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106396

7. *Lee D.S., Koo S.H., Seong Y.B., Jo J.H.* Evaluating thermal and lighting energy performance of shading devices on kinetic façades // Sustainability. 2016. Vol. 8. Issue 9. P. 883. DOI: 10.3390/su8090883

8. *Samadi S., Noorzai E., Beltrán L.O., Abbasi S.* A computational approach for achieving optimum daylight inside buildings through automated kinetic shading systems // Frontiers of Architectural Research. 2020. Vol. 9. Issue 2. Pp. 335–349. DOI: 10.1016/j.foar.2019.10.004

9. *Ning B., Chen Y.* A radiant and convective time series method for cooling load calculation of radiant ceiling panel system // Building and Environment. 2021. Vol. 188. P. 107411. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107411

10. *Huang C., Bai T., Cai J., Lv L., Chen J., Li L.* Experimental study on the radiant cooling load of floor based on the radiant time series method // Procedia Engineering. 2015. Vol. 121. Pp. 45–51. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.1017

11. *Vijayalaxmi J.* Concept of overall thermal transfer value (OTTV) in design of building envelope to achieve energy efficiency // International Journal

of Thermal and Environmental Engineering. 2010. Vol. 1. Issue 2. Pp. 75–80. DOI: 10.5383/ijtee.01.02.003

12. *Богословский В.Н., Фам Нгок-Данг.* Расчет суммарного теплопоступления в помещение через окно // Водоснабжение и санитарная техника. 1973. № 1.

13. *Богословский В.Н. и др.* Внутренние санитарно-технические устройства (часть 3). Книга 1. М. : Стройиздат, 1992. 320 с.

14. *Чан Нгок Тьян, Фам Ван Лыонг, Нгуен Тхи Хань Фыонг.* Метод расчета солнцезащитных устройств // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : мат. XVII Междунар. науч. конф. Крым, 2019. С. 100–109. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=43942987&

15. *Чан Нгок Тьян, Хоанг Нам Тханг, Фам Ван Лыонг, Нгуен Тхи Хань Фыонг.* Метод расчета солнцезащитного устройства типа прямоугольника // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: сборник трудов : мат. XVIII Междунар. науч. конф. Волгоград, 2020. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=43955238&pf=1

16. *Чан Нгок Тьян.* Снижение теплопоступлений через строительную оболочку здания с целью уменьшения энергопотребления систем кондиционирования воздуха // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : сб тр. Хайфа, 2014. С. 271–277.

17. *Коркина Е.В., Горбаренко Е.В., Гагарин В.Г., Шмаров И.А.* Основные соотношения для расчета облучения солнечной радиацией стен отдельно стоящих зданий // Жилищное строительство. 2017. № 6. С. 27–33.

Поступила в редакцию 26 мая 2021 г.
Принята в доработанном виде 31 мая 2021 г.
Одобрена для публикации 2 июня 2021 г.

Об авторах: **Чан Нгок Тьян** — кандидат технических наук, профессор, профессор департамента микроклимата и строительной окружающей среды, факультет строительной окружающей среды; **Национальный строительный университет**; г. Ханой, Зай Фонг, № 55; tnchan1937@yahoo.com;

Нгуен Тхи Хань Фыонг — кандидат технических наук, преподаватель департамента экологической архитектуры, факультет архитектуры и планирования; **Национальный строительный университет**; г. Ханой, Зай Фонг, № 55; РИНЦ ID 978551, Scopus: 57212346606, ORCID: 0000-0001-8466-9067; phuongntk@nuce.edu.vn;

Екатерина Валентиновна Горбаренко — кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник кафедры метеорологии и климатологии географического факультета; **Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ)**; 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1; РИНЦ ID: 64816, Scopus: 6505871559, ResearcherID: M-2970-2015; catgor@mail.ru.

REFERENCES

1. Stetskiy S.V., Khodeir W.A. Effective Sun Protection Devices in the Civil Engineering of Hot and Sunny Regions. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 7:9-15. (rus.).

2. Carletti C., Sciurpi F., Pierangioli L. The energy upgrading of existing buildings: Window and shading device typologies for energy efficiency refurbishment. *Sustainability.* 2014; 6(8):5354-5377. DOI: 10.3390/su6085354

3. Chua K.J., Chou S.K. Evaluating the performance of shading devices and glazing types to promote energy efficiency of residential buildings. *Building Simulation*. 2010; 3(3):181-194. DOI: 10.1007/s12273-010-0007-2

4. Bianco L., Vigna I., Serra V. Energy assessment of a novel dynamic PCMs based solar shading: results from an experimental campaign. *Energy and Buildings.* 2017; 150:608-624. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.05.067

5. Tamrazyan A.G. Basic Principles of Risk Assessment in Structural Engineering. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 2-1:21-27. (rus.).

6. Hosseini S.M., Mohammadi M., Guerra-Santin O. Interactive kinetic façade: Improving visual comfort based on dynamic daylight and occupant's positions by 2D and 3D shape changes. *Building and Environment.* 2019; 165:106396. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106396

7. Lee D.S., Koo S.H., Seong Y.B., Jo J.H. Evaluating thermal and lighting energy performance of shading devices on kinetic façades. *Sustainability*. 2016; 8(9):883. DOI: 10.3390/su8090883

8. Samadi S., Noorzai E., Beltrán L.O., Abbasi S. A computational approach for achieving optimum daylight inside buildings through automated kinetic shading systems. *Frontiers of Architectural Research*. 2020; 9(2):335-349. DOI: 10.1016/j.foar.2019.10.004

9. Ning B., Chen Y. A radiant and convective time series method for cooling load calculation of radiant ceiling panel system. *Building and Environment*. 2021; 188:107411. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107411

10. Huang C., Bai T., Cai J., Lv L., Chen J., Li L. Experimental study on the radiant cooling load of floor based on the radiant time series method. *Procedia Engineering*. 2015; 121:45-51. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.1017

11. Vijayalaxmi J. Concept of Overall Thermal Transfer Value (OTTV) in Design of Building Envelope to Achieve Energy Efficiency. *International Journal of Thermal and Environmental Engineering*. 2010; 1(2):75-80. DOI: 10.5383/ijtee.01.02.003

12. Bogoslovsky V.N., Pham Ngok-Dang. Calculation of the total heat input into the room through the window. *Water Supply and Sanitary Technique*. 1973; 1. (rus.).

13. Bogoslovsky V.N. et al. *Internal sanitary devices (part 3). Book 1.* Moscow, Stroyizdat, 1992; 320. (rus.).

14. Tran Ngoc Chan, Pham Van Luong, Nguyen Thi Khanh Phuong. Calculation method for sun shading devices. *Quality of indoor air and environment: materials of the XVII International Scientific Conference*. Crimea, 2019; 100-109. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=43942987& (rus.).

15. Tran Ngoc Chan, Hoang Nam Thanh, Pham Van Luong, Nguyen Thi Khanh Phuong. Method for calculating rectangle-type sun protection devices. *Quality of indoor air and environment: materials XVIII International Scientific Conference.* Volgograd, 2020. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=43955238&pf=1 (rus.).

16. Tran Ngoc Chan. Reducing heat gain through the building envelope in order to reduce the energy consumption of air conditioning systems. *Quality of indoor air and environment*. Khayfa, 2014; 271-277. (rus.).

17. Korkina E.V., Gorbarenko E.V., Gagarin V.G., Shmarov I.A. Basic relationships for calculation of solar radiation expousureof walls of separate buildings. *Housing Construction*. 2017; 6:27-33. (rus.).

Received May 26, 2021.
Adopted in revised form on May 31, 2021.
Approved for publication on June 2, 2021.

Bionotes: **Tran Ngoc Chan** — PhD, Professor, Professor of the Department of Microclimate and Building Environment, Faculty of Building Environment; **National University of Civil Engineering (NUCE)**; 55 Giai Phong, Hanoi, Vietnam; tnchan1937@yahoo.com;

Nguyen Thi Khanh Phuong — PhD of the Department of Environmental Architecture, Faculty of Architecture & Planning; **National University of Civil Engineering (NUCE)**; 55 Giai Phong, Hanoi, Vienam, ID RISC: 978551, Scopus: 57212346606, ORCID: 0000-0001-8466-9067; phuongntk@nuce.edu.vn;

Ekaterina V. Gorbarenko — PhD of Geographical Sciences, Leading Researcher of the Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geography; **Lomonosov Moscow State University (MSU)**; 1 Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119991, Russian Federation; ID RISC: 64816, Scopus: 6505871559, ResearcherID: M-2970-2015; catgor@mail.ru.

УДК 539.3 DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.666-675

Вейвлет-реализация дискретно-континуального метода конечных элементов на основе B-сплайнов для локального расчета пластины

П.А. Акимов, М.Л. Мозгалева, Т.Б. Кайтуков
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Строится локальное численно-аналитическое решение задачи об изгибе изотропной пластины. Область исследования составляют пластины, у которых по одному из направлений имеется регулярность (постоянство) физико-геометрических параметров (модуль упругости материала пластины, коэффициент Пуассона материала пластины, размеры поперечного сечения пластины). Это направление условно называется основным.

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

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

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

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дискретно-континуальный метод конечных элементов, вейвлет-реализация, B-сплайны, расчет пластины, локальное решение, дискретно-континуальная операторная постановка, метод стандартной (расширенной) области

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Акимов П.А., Мозгалева М.Л., Кайтуков Т.Б.* Вейвлет-реализация дискретно-континуального метода конечных элементов на основе B-сплайнов для локального расчета пластины // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 6. С. 666–675. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.666-675

About the B-spline wavelet discrete-continual finite element method of the local plate analysis

Pavel A. Akimov, Marina L. Mozgaleva, Taymuraz B. Kaytukov
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This distinctive paper addresses the local semi-analytical solution to the problem of plate analysis. Isotropic plates featuring the regularity (constancy) of physical and geometric parameters (modulus of elasticity of the plate material, Poisson's ratio of the plate material, dimensions of the cross section of the plate) along one direction (dimension) are under

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

© П.А. Акимов, М.Л. Мозгалева, Т.Б. Кайтуков, 2021
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

consideration. This direction is conventionally called the basic direction.

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

Results. Some relevant issues of construction of normalized basis functions of the B-spline are considered; the technique of approximation of corresponding vector functions and operators within DCFEM is described. The problem remains continual if analyzed along the basic direction, and its exact analytical solution can be obtained, whereas the finite element approximation is used in combination with a wavelet analysis apparatus in respect of the non-basic direction. As a result, we can obtain a discrete-continual formulation of the problem. Thus, we have a multi-point (in particular, two-point) boundary problem for the first-order system of ordinary differential equations with constant coefficients. A special correct analytical method of solving such problems was developed, described and verified in the numerous papers of the co-authors. In particular, we consider the simplest sample analysis of a plate (rectangular in plan) fixed along the side faces exposed to the influence of the load concentrated in the center of the plate.

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

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

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

ВВЕДЕНИЕ

Прежде всего, следует отметить, что за последние годы было опубликовано немало работ, посвященных различным вариантам вейвлет-реализаций метода конечных элементов (МКЭ), основанных на использовании сплайн-вейвлетов [1–7].

В частности, решению задач об изгибе пластин методом Ритца с помощью бикубических фундаментальных сплайнов посвящена статья H. Antes [8]. Различные варианты вейвлет-реализаций МКЭ на основе сплайн-вейвлетов применительно к разным задачам расчета (в том числе на этапе мониторинга состояния) строительных конструкций, включая вопросы построения новых типов конечных элементов (в том числе вейвлет-элементов), описаны в трудах: П.А. Акимова, Т.Б. Кайтукова, М.Л. Мозгалевой [6, 7, 9]; X.F. Chen [10–18]; D.P. Chen [19]; H.B. Dong [12]; J.G. Han [20–23]; Y.M. He [14]; Z.H. He [16]; Z.J. He [10–15, 17, 18]; Y. Huang [20–23]; Z.S. Jiang [24]; B. Li [10, 12, 14, 15]; M. Liang [25, 26]; J.Q. Long [27]; G. Ma [27]; T. Matsumoto [24, 27]; S.T. Mau [28]; H.H. Miao [15]; Q.M. Mo [16]; T.H.H. Pian [19, 28, 29]; K. Simuhara [29]; P. Tong [28]; K.Y. Qi [12]; W.X. Ren [20–23]; Y.W. Wang [24]; J.W. Xiang [10, 13, 14, 16, 24–27, 30]; Z.B. Yang [11, 15, 17]; X.W. Zhang [11, 17, 18]; Y.H. Zhang [13]; Y.T. Zhong [30].

Как показано в исследованиях перечисленных специалистов, предложенные ими подходы эффективны с точки зрения численной реализации, в том числе при наличии сингулярностей обладают высокой точностью, быстрой сходимостью и могут рассматриваться как альтернатива стандартному МКЭ.

Настоящее исследование продолжает серию статей авторов [6, 7], развивающих теорию и приложения вейвлет-реализаций дискретно-континуального метода конечных элементов (ДКМКЭ) [1–7].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пусть x_2 — переменная, соответствующая основному направлению. Операторная постановка в рамках метода стандартной области [4] с учетом выделения основного направления определяется уравнением:

$$-L_4\,\partial_2^4 y + L_2\,\partial_2^2 y + L_0\,y = \theta F + \delta_\Gamma f, \qquad (1)$$

где x_1, x_2 — используемые декартовы координаты; l_1, l_2 — соответствующие габаритные размеры пластины; Ω — область, занимаемая пластиной, $\Omega = \{(x_1, x_2)/0 < x_1 < l_1,\ 0 < x_2 < l_2\}$; $\Gamma = \partial\Omega$ — граница области Ω; θ — характеристическая функция области Ω; δ_Γ — дельта-функция границы Γ; y — прогиб пластины; F — нагрузка на пластину, приложенная в области Ω; f — нагрузка, приложенная на границе Γ; $\partial_1 = \partial/\partial x_1$; $\partial_2 = \partial/\partial x_2$; $\partial_1^2 = \partial^2/\partial x_1^2$; $\partial_2^2 = \partial^2/\partial x_2^2$;

$$L_4 = \theta D;$$

$$L_2 = -\left[\partial_1^2 \theta D\nu + 2\partial_1 \theta D(1-\nu)\partial_1 + \theta D\nu\partial_1^2\right]; \qquad (2)$$

$$L_0 = -\partial_1^2 \theta D \partial_1^2,$$

где D — цилиндрическая жесткость пластины; ν — коэффициент Пуассона материала пластины.

После введения обозначений:

$$y_1 = y;\ y_2 = \partial_2 y = y_1';$$
$$y_3 = \partial_2^2 y = y_2';\ y_4 = \partial_2^3 y = y_3', \qquad (3)$$

можем переписать уравнение (1) в виде системы дифференциальных уравнений с операторными коэффициентами:

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

где

$$\tilde{L}=\begin{bmatrix}0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\\L_4^{-1}L_0&0&L_4^{-1}L_2&0\end{bmatrix};\ \bar{\tilde{F}}=\begin{bmatrix}0\\0\\0\\-L_4^{-1}\tilde{F}\end{bmatrix};\ \bar{U}=\begin{bmatrix}y_1\\y_2\\y_3\\y_4\end{bmatrix},\quad(5)$$

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

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

$$k=1\Big/\varphi_{i,1}(t)=\begin{cases}1,\ x_i\le t<x_{i+1}\\0,\ t<x_i\vee t\ge x_{i+1}\end{cases};$$

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

$$+\frac{(x_{i+k}-t)\varphi_{i+1,k-1}(t)}{x_{i+k}-x_{i+1}}.$$

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

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

$$\times\left((t-m)^{2m-2}\,|\,t-m|\right);\quad(7)$$

$$k=2m+1\Big/\varphi_{0,k}(t)=\frac{1}{(2m)!}\frac{1}{2}\Delta_1(\Delta_2)^m\times$$

$$\times\left((t-m)^{2m-1}\,|\,t-m|\right),$$

где Δ_1 — оператор первой разности; Δ_2 — оператор второй разности; $\varphi_{i,k}(t)=\varphi_{0,k}(t-i)$; $\varphi_{0,k}(t)$ является полиномом степени $k-1$ с ограниченным носителем, равным интервалу $[0, k]$;

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

Дискретная составляющая численного решения представлена направлением вдоль оси x_1. Восполнение на элементе (отрезке) для всех компонентов вектор-функции $\bar{U}$ (см. выражение (5)) одинаковое. Поэтому для простоты изложения при последующих построениях обозначим $x=x_1$, $\ell=\ell_1$ и $y=y_j$ для всех $j=1, 2, 3, 4$. Разобьем отрезок $(0, \ell)$ на N_e частей (элементов), $h_e=\ell/N_e$ — длина элемента. Каждый элемент разобьем также на N_k частей. При этом на элементах локализации решения N_k имеет большее значение, чем на остальных элементах. Например, на элементах локализации можно задать $N_k=5$. Обозначим: i_e — номер элемента; $N_p=N_k+1=6$ — количество узлов на элементе; $x_1(i_e)$ и $x_6(i_e)$ — соответственно координаты начальной и конечной точек i_e-го элемента. В граничных точках примем в качестве неизвестных y_i и y_i', $i=1, 6$, во внутренних — $y_i, i=2, 3, 4, 5$. Таким образом, количество неизвестных на элементе при такой разбивке равно $N_{ie}=N_k-1+2\cdot 2=N_k+3=8$. Переход к локальным координатам осуществляется по формуле:

$$t=\left(x-x_{1(ie)}\right)\Big/h_e,\ x_{1(ie)}\le x\le x_{N_p(ie)},\ 0\le t\le 1.\quad(9)$$

В случае $N_{ie}=8$ для представления неизвестной функции прогиба воспользуемся B-сплайном степени 7. Обозначим

$$\varphi(t)=\varphi_{0,8}(t+4)=\frac{1}{7!}\frac{1}{2}(\Delta_2)^4\left(t^6\,|\,t|\right)=$$
$$=\frac{1}{2\cdot 7!}\Big[(t+4)^6\,|\,t+4|-8(t+3)^6\,|\,t+3|+$$
$$+28(t+2)^6\,|\,t+2|-56(t+1)^6\,|\,t+1|+\quad(10)$$
$$+70t^6\,|\,t|-56(t-1)^6\,|\,t-1|+28(t-2)^6\times$$
$$\times|\,t-2|-8(t-3)^6\,|\,t-3|+(t-4)^6\,|\,t-4|\Big].$$

Эта функция является B-сплайном, симметричным относительно $t=0$, и ее носитель определен интервалом $[-4, 4]$.

В качестве базисных функций на единичном отрезке принимаем следующие восемь функций:

$$\varphi_1(t)=\varphi(t+3),\ \varphi_2(t)=\varphi(t+2),\ \varphi_3(t)=\varphi(t+1),$$
$$\varphi_4(t)=\varphi(t),\ \varphi_5(t)=\varphi(t-1),\ \varphi_6(t)=\varphi(t-2),\quad(11)$$
$$\varphi_7(t)=\varphi(t-3),\ \varphi_8(t)=\varphi(t-4),\ 0\le t\le 1.$$

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

$$y(x)=w(t)=\sum_{k=1}^{N_{ie}}\alpha_k\varphi_k(t),\quad(12)$$
$$x_{1(ie)}\le x\le x_{N_p(ie)},\ 0\le t\le 1.$$

Для построения локальных матриц жесткости, соответствующих операторам L_0, L_2 и L_4 (см. уравнение (2)), рассмотрим билинейные формы:

$$B_0(y,z)=\langle L_0y,z\rangle=-\int_{x_{1(ie)}}^{x_{N_p(ie)}}\frac{d^2}{dx^2}\theta D\frac{d^2y}{dx^2}\times$$
$$\times z\,dx=-\theta_{ie}D_{ie}\int_{x_{1(ie)}}^{x_{N_p(ie)}}\frac{d^2y}{dx^2}\,\frac{d^2z}{dx^2}dx=\quad(13)$$
$$=-\frac{1}{h_e^3}\theta_{ie}D_{ie}\int_0^1\frac{d^2w}{dt^2}\,\frac{d^2v}{dt^2}dt=B_0(w,v),$$

$$B_4(y,z)=<L_4y,z>=\theta_{ie}D_{ie}\int_{x_{1(ie)}}^{x_{N_p(ie)}}y\times\quad(14)$$
$$\times z\,dx=h_e\theta_{ie}D_{ie}\int_0^1 w\,v\,dt=B_4(w,v),$$

$$B_2(y,z)=\langle L_2y,z\rangle=\langle L_{21}y,z\rangle+\quad(15)$$
$$+\langle L_{22}y,z\rangle+\langle L_{23}y,z\rangle,$$

где

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

$$\langle L_{21}y,\ z\rangle = -\theta_{ie}D_{ie}\nu_{ie}\int_{x_{1(ie)}}^{x_{N_p(ie)}}\frac{d^2y}{dx^2}z\,dx = \\ = -\frac{1}{h_e}\theta_{ie}D_{ie}\nu_{ie}\int_0^1\frac{d^2w}{dt^2}v\,dt = B_{21}(w,\ v), \tag{16}$$

$$\langle L_{23}y,\ z\rangle = -\theta_{ie}D_{ie}\nu_{ie}\int_{x_{1(ie)}}^{x_{N_p(ie)}} y\ \frac{d^2z}{dx^2}dx = \\ = -\frac{1}{h_e}\theta_{ie}D_{ie}\nu_{ie}\int_0^1 w\ \frac{d^2v}{dt^2}dt = B_{23}(w,\ v), \tag{17}$$

$$\langle L_{22}y,\ z\rangle = -2\int_{x_{1(ie)}}^{x_{N_p(ie)}}\frac{d}{dx}\theta D(1-\nu)\frac{dy}{dx}\ z\,dx = \\ = 2\theta_{ie}D_{ie}(1-\nu_{ie})\int_{x_{1(ie)}}^{x_{N_p(ie)}}\frac{dy}{dx}\ \frac{dz}{dx}dx = \\ = \frac{1}{h_e}2\theta_{ie}D_{ie}(1-\nu_{ie})\int_0^1\frac{dw}{dt}\ \frac{dv}{dt}dt = B_{22}(w,\ v), \tag{18}$$

на функциях вида (12):

$$y(x) = w(t) = \sum_{k=1}^{N_{ie}}\alpha_k\varphi_k(t), \\ z(x) = v(t) = \sum_{k=1}^{N_{ie}}\beta_k\varphi_k(t), \\ x_{1(ie)} \le x \le x_{N_p(ie)},\ 0 \le t \le 1. \tag{19}$$

Можно показать, что, подставив выражение (19) последовательно в формулы (13)–(18), получим:

$$B_0(w,\ v) = -\frac{\theta_{ie}D_{ie}}{h_e^3}\left(K^0_{\alpha\beta}\bar{\alpha},\ \bar{\beta}\right), \tag{20}$$

где $K^0_{\alpha\beta}(i,\ j) = \int_0^1\varphi_i''(t)\varphi_j''(t)dt,\ \varphi'' = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$;

$$B_4(w,\ v) = h_e\theta_{ie}D_{ie}\left(K^4_{\alpha\beta}\bar{\alpha},\ \bar{\beta}\right), \tag{21}$$

где $K^4_{\alpha\beta}(i,\ j) = \int_0^1\varphi_i''(t)\varphi_j(t)dt$;

$$B_{21}(w,\ v) = -\frac{\theta_{ie}D_{ie}\nu_{ie}}{h_e}\left(K^{21}_{\alpha\beta}\bar{\alpha},\ \bar{\beta}\right), \tag{22}$$

где $K^{21}_{\alpha\beta}(i,\ j) = \int_0^1\varphi_i''(t)\varphi_j(t)dt$;

$$B_{23}(w,\ v) = -\frac{\theta_{ie}D_{ie}\nu_{ie}}{h_e}\left(K^{23}_{\alpha\beta}\bar{\alpha},\ \bar{\beta}\right), \tag{23}$$

где $K^{23}_{\alpha\beta}(i,\ j) = \int_0^1\varphi_i(t)\varphi_j''(t)dt = K^{21}_{\alpha\beta}(j,\ i)$;

$$B_{22}(w,\ v) = 2\frac{\theta_{ie}D_{ie}(1-\nu_{ie})}{h_e}\left(K^{22}_{\alpha\beta}\bar{\alpha},\ \bar{\beta}\right), \tag{24}$$

где $K^{22}_{\alpha\beta}(i,\ j) = \int_0^1\varphi_i'(t)\varphi_j'(t)dt,\ \varphi' = \frac{d\varphi}{dt}$.

Определим параметры α_k и β_k через узловые неизвестные на элементе:

$$y_i = w(t_i) = \sum_{k=1}^{N_{ie}}\alpha_k\varphi_k(t_i), \\ \frac{dy_i}{dx} = \frac{1}{h_e}w'(t_i) = \frac{1}{h_e}\sum_{k=1}^{N_{ie}}\alpha_k\varphi_k'(t_i), \\ t_i = \left(x_i - x_{1(ie)}\right)/h_e,\ i = 1,\ \ldots,\ N_P. \tag{25}$$

В случае $N_{ie} = 8$ имеем:

$$\bar{y}^{ie} = T_8\bar{\alpha}, \tag{26}$$

где $\bar{y}^{ie} = [\,y_1\ \ \frac{dy_1}{dx}\ \ y_2\ \ y_3\ \ y_4\ \ y_5\ \ y_6\ \ \frac{dy_6}{dx}\,]^T$,

$\bar{\alpha} = [\,\alpha_1\ \ \alpha_2\ \ \alpha_3\ \ \alpha_4\ \ \alpha_5\ \ \alpha_6\ \ \alpha_7\ \ \alpha_8\,]^T$;

$$T_8 = D_8\begin{bmatrix} \varphi_1(0) & \varphi_2(0) & \varphi_3(0) & \varphi_4(0) & \varphi_5(0) & \varphi_6(0) & \varphi_7(0) & \varphi_8(0) \\ \varphi_1'(0) & \varphi_2'(0) & \varphi_3'(0) & \varphi_4'(0) & \varphi_5'(0) & \varphi_6'(0) & \varphi_7'(0) & \varphi_8'(0) \\ \varphi_1(0,2) & \varphi_2(0,2) & \varphi_3(0,2) & \varphi_4(0,2) & \varphi_5(0,2) & \varphi_6(0,2) & \varphi_7(0,2) & \varphi_8(0,2) \\ \varphi_1(0,4) & \varphi_2(0,4) & \varphi_3(0,4) & \varphi_4(0,4) & \varphi_5(0,4) & \varphi_6(0,4) & \varphi_7(0,4) & \varphi_8(0,4) \\ \varphi_1(0,6) & \varphi_2(0,6) & \varphi_3(0,6) & \varphi_4(0,6) & \varphi_5(0,6) & \varphi_6(0,6) & \varphi_7(0,6) & \varphi_8(0,6) \\ \varphi_1(0,8) & \varphi_2(0,8) & \varphi_3(0,8) & \varphi_4(0,8) & \varphi_5(0,8) & \varphi_6(0,8) & \varphi_7(0,8) & \varphi_8(0,8) \\ \varphi_1(1) & \varphi_2(1) & \varphi_3(1) & \varphi_4(1) & \varphi_5(1) & \varphi_6(1) & \varphi_7(1) & \varphi_8(1) \\ \varphi_1'(1) & \varphi_2'(1) & \varphi_3'(1) & \varphi_4'(1) & \varphi_5'(1) & \varphi_6'(1) & \varphi_7'(1) & \varphi_8'(1) \end{bmatrix}, \tag{27}$$

$D_8 = diag\left(1\ \ 1/h_e\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1\ \ 1/h_e\right)$.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

В случае $N_{ie} = 6$:

$$\bar{y}^{ie} = T_6 \bar{\alpha}, \quad \text{где } \bar{y}^{ie} = \left[y_1 \ \frac{dy_1}{dx} \ y_2 \ y_3 \ y_4 \ \frac{dy_4}{dx} \right]^T; \quad \bar{\alpha} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4 \ \alpha_5 \ \alpha_6]^T; \tag{28}$$

$$T_6 = D_6 \begin{bmatrix} \varphi_1(0) & \varphi_2(0) & \varphi_3(0) & \varphi_4(0) & \varphi_5(0) & \varphi_6(0) \\ \varphi_1'(0) & \varphi_2'(0) & \varphi_3'(0) & \varphi_4'(0) & \varphi_5'(0) & \varphi_6'(0) \\ \varphi_1(1/3) & \varphi_2(1/3) & \varphi_3(1/3) & \varphi_4(1/3) & \varphi_5(1/3) & \varphi_6(1/3) \\ \varphi_1(2/3) & \varphi_2(2/3) & \varphi_3(2/3) & \varphi_4(2/3) & \varphi_5(2/3) & \varphi_6(2/3) \\ \varphi_1(1) & \varphi_2(1) & \varphi_3(1) & \varphi_4(1) & \varphi_5(1) & \varphi_6(1) \\ \varphi_1'(0) & \varphi_2'(0) & \varphi_3'(0) & \varphi_4'(0) & \varphi_5'(0) & \varphi_6'(0) \end{bmatrix}, \tag{29}$$

$$D_6 = diag\left(1 \ \ 1/h_e \ \ 1 \ \ 1 \ \ 1 \ \ 1/h_e\right).$$

В случае $N_{ie} = 4$ имеем:

$$\bar{y}^{ie} = T_4 \bar{\alpha}, \tag{30}$$

где $\bar{y}^{ie} = \left[y_1 \ \frac{dy_1}{dx} \ y_2 \ \frac{dy_2}{dx} \right]^T$, $\bar{\alpha} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4]^T$;

$$T_4 = D_4 \begin{bmatrix} \varphi_1(0) & \varphi_2(0) & \varphi_3(0) & \varphi_4(0) \\ \varphi_1'(0) & \varphi_2'(0) & \varphi_3'(0) & \varphi_4'(0) \\ \varphi_1(1) & \varphi_2(1) & \varphi_3(1) & \varphi_4(1) \\ \varphi_1'(1) & \varphi_2'(1) & \varphi_3'(1) & \varphi_4'(1) \end{bmatrix}, \tag{31}$$

$$D_4 = diag\left(1 \ \ 1/h_e \ \ 1 \ \ 1/h_e\right).$$

Аналогично получим:

$$\bar{z}^{ie} = T_{N_{ie}} \bar{\beta} \ \text{ для } N_{ie} = 8, N_{ie} = 6, N_{ie} = 4. \tag{32}$$

Из выражений (26), (28), (30) и (32) следует:

$$\bar{\alpha} = T_{N_{ie}}^{-1} \bar{y}^{i_e}, \ \bar{\beta} = T_{N_{ie}}^{-1} \bar{z}^{ie}. \tag{33}$$

В общем случае, имеет место следующая цепочка равенств:

$$\left(K_{\alpha\beta}\bar{\alpha}, \bar{\beta}\right) = \left(K_{\alpha\beta} T_{N_{ie}}^{-1} \bar{y}^{ie}, T_{N_{ie}}^{-1} \bar{z}^{ie}\right) = \left(\left(T_{N_{ie}}^{-1}\right)^T K_{\alpha\beta} T_{N_{ie}}^{-1} \bar{y}^{ie}, \bar{z}^{ie}\right).$$

Таким образом, подставляя выражение (33) последовательно в (20)–(24), получим локальные матрицы жесткости K_0^{ie}, K_4^{ie}, K_{21}^{ie}, K_{23}^{ie}, K_{22}^{ie}, K_2^{ie}, соответствующие операторам L_0, L_4, L_{21}, L_{23}, L_{22}, L_2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера рассмотрим задачу об изгибе тонкой плиты, жестко закрепленной по боковым граням, под воздействием сосредоточенной в центре нагрузки (рис. 1).

Геометрические параметры: L_1 = 0,9 м, L_2 = 1,0 м, h = 0,05 м — толщина. Расчетные параметры материала плиты: коэффициент упругости $E = 3000 \cdot 10^4$ кН/м^2, коэффициент Пуассона ν = 0,16. Параметр внешней нагрузки: P = 1 кН.

Рассмотрим расчет с учетом локализации. Зададим N_e = 6 — количество элементов. Длина

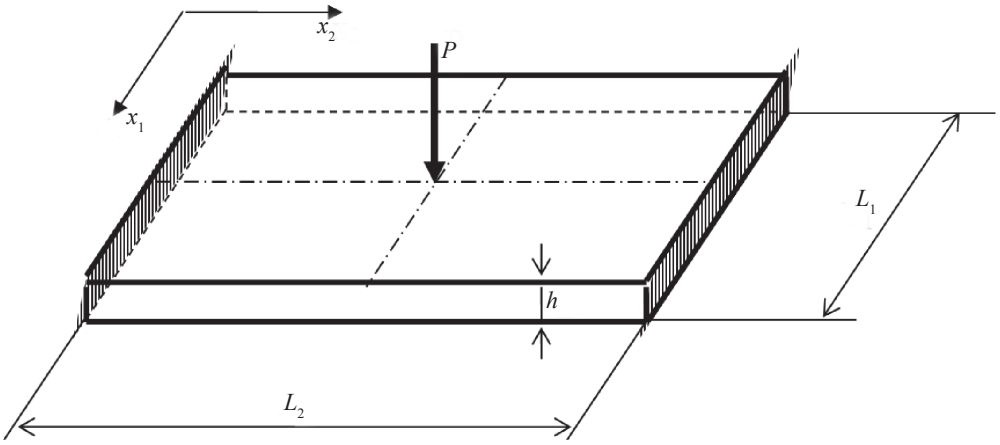


Рис. 1. Пример расчета (к постановке задачи)

Fig. 1. Sample calculations (following the problem statement)

элемента $h_e = \ell_1/N_e = 0{,}9/6 = 0{,}15$. Определим локализацию решения в зоне нагрузки. Элементы 1 и 6: $N_k = 1$ — сплайн третьего порядка, $h_1 = h_6 = 0{,}15/1 = 0{,}15$ — шаг между узлами на элементах 1 и 6. Элементы 2 и 5: $N_k = 3$ — сплайн пятого порядка, $h_2 = h_5 = 0{,}15/3 = 0{,}05$ — шаг между узлами на элементах 2 и 5. Элементы 3 и 4 (под нагрузкой): $N_k = 5$ — сплайн седьмого порядка, $h_3 = h_4 = 0{,}15/5 = 0{,}03$ — шаг между узлами на элементах 3 и 4. Общее количество внутренних узлов $N_p = 2(4+2+0) = 12$, общее количество граничных узлов $N_b = N_e + 1 = 7$. Суммарное количество узлов по всем элементам составляет $N_x = N_p + N_b = 12 + 7 = 19$. Количество узловых неизвестных для каждой компоненты y_j, $j = 1, 2, 3, 4$: $N_g = N_p + 2N_b = 12 + 2 \cdot 7 = 26$. Общее количество узловых неизвестных $N_U = 4N_g = 4 \cdot 26 = 104$.

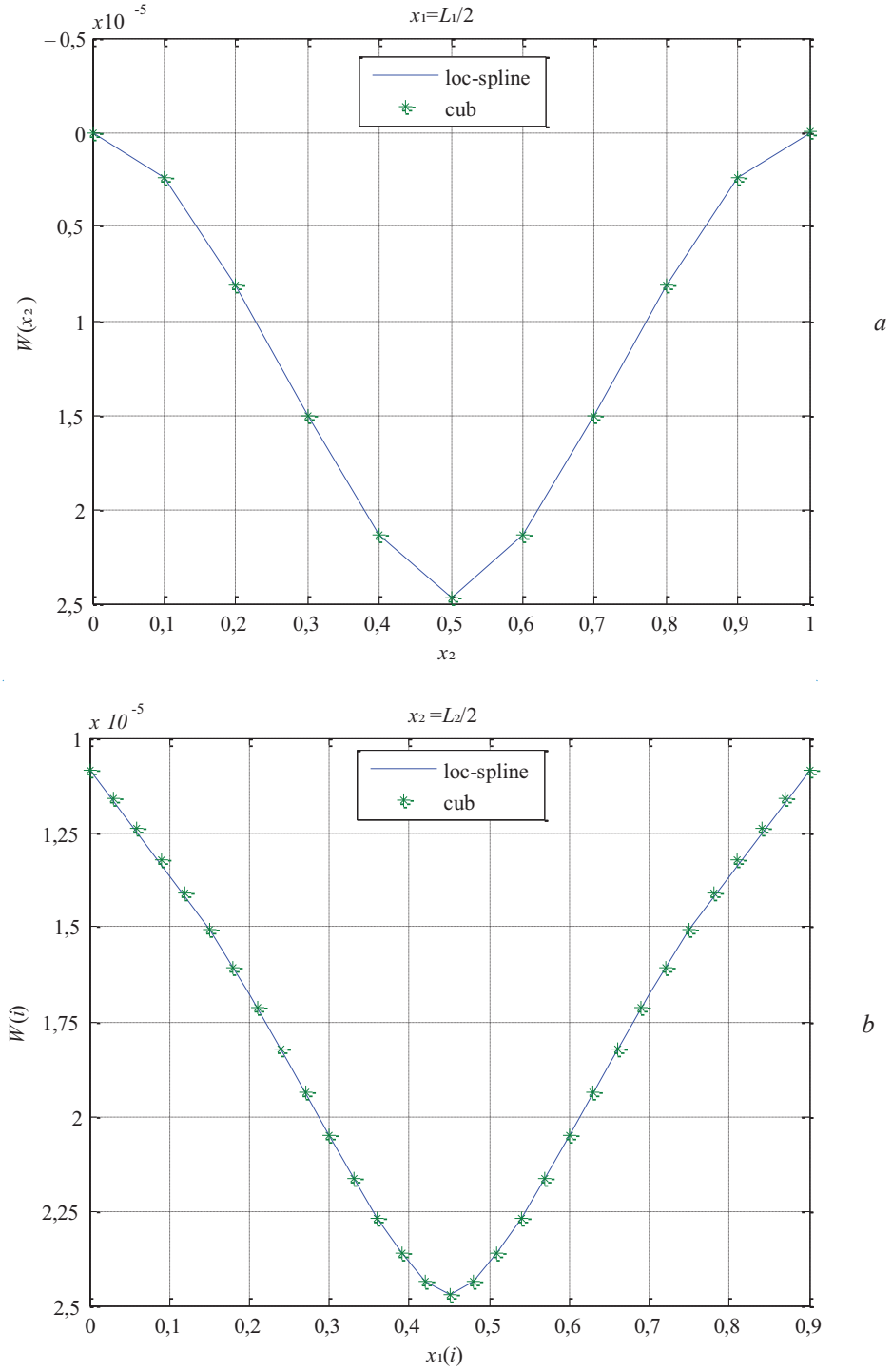


Рис. 2. Сопоставление результатов счета в серединных сечениях: *a* — по направлению x_1; *b* — по направлению x_2

Fig. 2. The correlation of the results obtained for the center sections: *a* — along the x_1 direction; *b* — along the x_2 direction

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6. 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6. 2021

Рассмотрим также расчет без учета локализации. В этом случае будем исследовать только стандартное кубическое восполнение. При этом длина элемента принимается равной минимальному шагу между узлами, т.е. $h_e = 0{,}03$. Тогда количество элементов $N_e = 0{,}9/0{,}03 = 30$ и общее количество узлов $N_x = 31$. В этом случае количество узловых неизвестных для каждой компоненты вектор-функции y_j, $j = 1, 2, 3, 4$: $N_g = 2N_x = 2 \cdot 31 = 62$ и общее количество узловых неизвестных $N_U = 4N_g = 4 \cdot 62 = 248$.

Выше представлено графическое сопоставление результатов счета (рис. 2), при этом locspline — узловые значения, полученные с учетом локализации; cub — узловые значения, полученные без учета локализации.

Как видно, полученные результаты практически полностью совпадают. И при этом применение локализации на основе использования B-сплайнов различной степени приводит к существенному уменьшению количества неизвестных. Разница для рассматриваемого примера составляет $N_{Ucub} - N_{Uloc} = 248 - 104 = 144$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Итак, в настоящей статье представлена вейвлет-реализация ДКМКЭ на основе B-сплайнов для локального расчета пластин, у которых по одному из направлений имеется регулярность (постоянство) физико-геометрических параметров. Исходной является операторная постановка задачи в рамках метода расширенной (стандартной) области, реализован переход к соответствующей дискретно-континуальной постановке, рассмотрено решение верификационного примера, подтвердившее высокую эффективность и точность предложенного подхода, который представляется весьма перспективным с учетом достигаемого значительного сокращения объема вычислительной работы вследствие существенной редукции неизвестных.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Добеши И.* Десять лекций по вейвлетам. Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 464 с.

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

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

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

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

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

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

8. *Antes H.* Bicubic fundamental splines in plate bending // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1974. Vol. 8. Issue 3. Pp. 503–511. DOI: 10.1002/nme.1620080306

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

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

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

12. *Dong H.B., Chen X.F., Li B., Qi K.Y., He Z.J.* Rotor crack detection based on high-precision modal parameter identification method and wavelet finite element model // Mechanical Systems and Signal Process-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 16. Выпуск 6, 2021**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 16. Issue 6, 2021**

ing. 2009. Vol. 23. Issue 3. Pp. 869–883. DOI: 10.1016/j.ymssp.2008.08.003

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

28. *Mau S.T., Tong P., Pian T.H.H.* Finite element solutions for laminated thick plates // Journal of Composite Materials. 1972. Vol. 6. Issue 2. Pp. 304–311. DOI: 10.1177/002199837200600212

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

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

Поступила в редакцию 6 июня 2021 г.
Принята в доработанном виде 6 июня 2021 г.
Одобрена для публикации 16 июня 2021 г.

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

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

Таймураз Батразович Кайтуков — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики, проректор, советник РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 335104, Scopus: 56528438800, ResearcherID: N-3930-2017, ORCID: 0000-0002-9589-9113; tkaytukov@gmail.com.

REFERENCES

1. Daubechies I. *Ten lectures on wavelet*. Izhevsk, Research Center “Regular and Chaotic Dynamics”, 2001; 464. (rus.).

2. Akimov P.A. Correct Discrete-Continual Finite Element Method of Structural Analysis Based on Precise Analytical Solutions of Resulting Multipoint Boundary Problems for Systems of Ordinary Differential Equations. *Applied Mechanics and Materials*. 2012; 204-208:4502-4505. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.204-208.4502

3. Akimov P.A., Belostosky A.M., Mozgaleva M.L., Aslami M., Negrozov O.A. Correct Multilevel Discrete-Continual Finite Element Method of Structural Analysis. *Advanced Materials Research*. 2014; 1040:664-669. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.1040.664

4. Akimov P.A., Mozgaleva M.L. Method of Extended Domain and General Principles of Mesh Approximation for Boundary Problems of Structural Analysis. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 580-583:2898-2902. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.580-583.2898

5. Akimov P.A., Mozgaleva M.L. Wavelet-based Multilevel Discrete-Continual Finite Element Method for Local Plate Analysis. *Applied Mechanics and Materials*. 2013; 351-352:13-16. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.351-352.13

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

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

8. Antes H. Bicubic Fundamental Splines in Plate Bending. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1974; 8(3):503-511. DOI: 10.1002/nme.1620080306

9. Mozgaleva M.L., Akimov P.A., Kaytukov T.B. Localization of Solution of the Problem of Isotropic Plate Analysis with the Use of B-Spline Discrete-Continual Finite Element Method. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.* 2021; 17(1):55-74. DOI: 10.22337/2587-9618-2021-17-1-55-74

10. Chen X.F., Xiang J.W., Li B., He Z.J. A Study of Multiscale Wavelet-Based Elements for Adaptive Finite Element Analysis. *Advances in Engineering Software*. 2010; 41(2):196-205. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2009.09.008

11. Chen X.F., Yang Z.B., Zhang X.W., He Z.J. Modeling of Wave Propagation in One-Dimension Structures Using B-Spline Wavelet on Interval Finite Element. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2012; 51:1-9. DOI: 10.1016/j.finel.2011.10.007

12. Dong H.B., Chen X.F., Li B., Qi K.Y., He Z.J. Rotor Crack Detection Based on High-Precision Modal Parameter Identification Method and Wavelet Finite Element Model. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009; 23(3):869-883. DOI: 10.1016/j.ymssp.2008.08.003

13. Xiang J.W., Chen X.F., He Z.J., Zhang Y.H. A New Wavelet-Based Thin Plate Element Using B-Spline Wavelet on the Interval. *Computational Mechanics.* 2007; 41(2):243-255. DOI: 10.1007/s00466-007-0182-x

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

15. Yang Z., Chen X., Li B., He Z., Miao H. Vibration Analysis of Curved Shell using B-spline Wavelet on the Interval (BSWI) Finite Elements Method and General Shell Theory. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2012; 85(2):129-156. DOI: 10.3970/cmes.2012.085.129

16. Xiang J.W., Chen X.F., Mo Q.M., He Z.H. Identification of Crack in a Rotor System Based on Wavelet Finite Element Method. *Finite Elements in Analysis and Design.* 2007; 43(14):1068-1081. DOI: 10.1016/j.finel.2007.07.001

17. Yang Z.B., Chen X.F., Zhang X.W., He Z.J. Free Vibration and Buckling Analysis of Plates Using B-Spline Wavelet on the Interval Mindlin Element. *Applied Mathematical Modelling.* 2013; 37(5):3449-3466. DOI: 10.1016/j.apm.2012.07.055

18. Zhang X.W., Chen X.F., He Z.J., Yang Z. The Analysis of Shallow Shells Based on Multivariable Wavelet Finite Element Method. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2011; 24(5):450-460. DOI: 10.1016/s0894-9166(11)60044-x

19. Pian T.H.H., Chen D.P. Alternative Ways for Formulation of Hybrid Stress Elements. *International*

Journal for Numerical Methods in Engineering. 1982; 18(11):1679-1684. DOI: 10.1002/nme.1620181107

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

21. Han J.G., Ren W.X., Huang Y. A Spline Wavelet Finite-Element Method in Structural Mechanics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2006; 66(1):166-190. DOI: 10.1002/nme.1551

22. Han J.G., Ren W.X., Huang Y. A Spline Wavelet Finite Element Formulation of Thin Plate Bending. *Engineering with Computers*. 2009; 25(4):319-326. DOI: 10.1007/s00366-009-0124-7

23. Han J.G., Ren W.X., Huang Y. A Wavelet-Based Stochastic Finite Element Method of Thin Plate Bending. *Applied Mathematical Modelling*. 2007; 31(2):181-193. DOI: 10.1016/j.apm.2005.08.020

24. Xiang J.W., Matsumoto T., Wang Y.W., Jiang Z.S. Detect Damages in Conical Shells Using Curvature Mode Shape and Wavelet Finite Element Method. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013; 66:83-93. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2012.10.010

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

26. Xiang J.W., Liang M. Wavelet-Based Detection of Beam Cracks Using Modal Shape and Frequency Measurements. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2012; 27(6):439-454. DOI: 10.1111/j.1467-8667. 2012.00760.x

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

28. Mau S.T., Tong P., Pian T.H.H. Finite Element Solutions for Laminated Thick Plates. *Journal of Composite Materials*. 1972; 6(2):304-311. DOI: 10.1177/002199837200600212

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

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

Received June 6, 2021.
Adopted in revised form on June 6, 2021.
Approved for publication on June 16, 2021.

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

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

Taymuraz B. Kaytukov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics, Advisor of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Vice-Rector; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 335104, Scopus: 56528438800, ResearcherID: N-3930-2017, ORCID: 0000-0002-9589-9113; tkaytukov@gmail.com.

УДК 624.014:621.7 DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.676-687

Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок

С.Г. Саиян, А.Г. Паушкин
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведено численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) двутавровых балок с гофрированными стенками различных типов, реализованное в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL. Приведены численные результаты по перемещениям, эквивалентным напряжениям и коэффициентам устойчивости в зависимости от изменения угла наклона гофр для трапециевидного, волнистого и треугольного профилей. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании и обосновании конструктивных решений для изгибаемых элементов.

Материалы и методы. Параметрическое исследование проведено на основе серии численных экспериментов методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL. На встроенном в программный комплекс параметрическом языке программирования APDL была написана программа, которая позволила выполнить параметрическое перестроение численной модели в зависимости от варьируемых параметров гофрированной стенки с последующим численным решением и постобработкой результатов расчета. Расчеты проводились на модели с габаритными размерами и материалом стандартного балочного двутавра со сплошной стенкой, загруженного равномерно распределенной поперечной нагрузкой.

Результаты. На основе параметрического исследования установлены основные особенности формирования НДС балок с различными типами гофрированных стенок. Составлена параметрическая численная модель для определения максимальных перемещений, эквивалентных напряжений и коэффициентов устойчивости для различных типов гофрированных стенок при различных параметрах угла наклона гофры. Для характерных параметров и типов гофр приведены изополя эквивалентных напряжений, а также формы потери устойчивости. Достоверность результатов подтверждается проведенной верификацией численной модели расчетом методом сопротивления материалов при угле наклона гофры $\alpha = 0$, что для всех вариантов различных типов гофр является исходной точкой моделирования.

Выводы. Полученные результаты на основе параметрических исследований выявили основные особенности формирования НДС балок с гофрированными стенками, что позволяет обосновать их эффективность в качестве конструктивных решений для изгибаемых элементов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численное моделирование, параметрическое исследование, метод конечных элементов, ANSYS Mechanical APDL, двутавровая балка, гофрированная стенка, напряженно-деформированное состояние, оптимизация, устойчивость плоской формы изгиба

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Саиян С.Г., Паушкин А.Г.* Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 6. С. 676–687. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.676-687

The numerical parametric study of the stress-strain state of I-beams having versatile corrugated webs

Sergey G. Saiyan, Alexander G. Paushkin
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The numerical parametric study of the stress-strain state of I-beams, having versatile corrugated walls, was carried out in the ANSYS Mechanical APDL software package. Numerical results are obtained for displacements, equivalent stresses and stability coefficients depending on the change in the inclination angle of web corrugations for trapezoidal, wavy and triangular profiles. The obtained results can help to design and substantiate the design solutions applicable to bending elements.

Materials and methods. The parametric study involved a series of numerical experiments conducted using the finite element method in the ANSYS Mechanical APDL software package. APDL parametric language was used to develop the software that was built into the software package. It allowed to perform a parametric reconstruction of the numerical

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 16. Выпуск 6, 2021**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 16. Issue 6, 2021**

© С.Г. Саиян, А.Г. Паушкин, 2021
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

model depending on varied parameters of the corrugated wall, and the reconstruction was followed by the numerical solution and post-processing of the calculation results. The calculations were made with the help of the model whose overall dimensions and material were identical to those of a standard I-beam having a solid wall exposed to a uniformly distributed transverse load.

Results. The parametric study enabled the co-authors to identify the main features of the stress-strain state of the beams that had different types of corrugated walls. A parametric numerical model was compiled to determine maximum displacements, equivalent stresses and stability coefficients for various types of corrugated walls and various parameters of the corrugation angle. Isofields of equivalent stresses and buckling modes are provided for characteristic parameters and types of corrugations. The reliability of the obtained results was confirmed by the verification of the numerical model using the method of the strength of materials and corrugation inclination angle α = 0, which was the initial point of simulation for all types of corrugations.

Conclusions. The results, obtained in the course of parametric studies, have identified the main features of the stress-strain state of beams having corrugated walls; they allow to substantiate their effectiveness as design solutions applied to bending elements.

KEYWORDS: numerical modeling, parametric study, finite element method, ANSYS Mechanical APDL, I-beam, corrugated wall, stress-strain state, optimization, flexural stability

FOR CITATION: Saiyan S.G., Paushkin A.G. The numerical parametric study of the stress-strain state of I-beams having versatile corrugated webs. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(6):676-687. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.676-687 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Одно из актуальных направлений исследований металлоконструкций — разработка оптимальных конструктивных и технологических решений, обеспечивающих несущую способность конструкций при минимальной массе. Применительно к изгибаемым элементам снижение металлоемкости достигается, например, применением перфорированных конструкций[1] [1–12] или балок с гофрированной стенкой[2] [13–23]. Стенки гофрированных изгибаемых элементов могут быть изготовлены из листовой прокатной стали, гнутых или прокатных профилей.

В связи с распространенностью в строительстве и разнообразием профилей гофрированных стенок важной задачей является повышение эффективности гофрированных балок посредством оптимизации геометрических параметров гофрированной стенки, проводимой с целью более полной реализации потенциальных возможностей несущих изгибаемых элементов.

Наиболее распространенные типы гофр представлены на рис. 1 [23].

В предыдущих статьях по определению оптимальных параметров изгибаемых элементов [24, 25] авторы изучили влияние параметров перфорации в виде круглого выреза на напряженное состояние балок, варьируя значения радиуса отверстий перфорации и шага между отверстиями *L*. В данной работе ставилась задача исследования влияния параметров и типов профилей гофрированной стенки на напряженно-деформированное состояние (НДС) составных балок, варьируя значения угла наклона гофры для различных типов профилей. Цель исследования — определение оптимального угла наклона гофры, что позволяет сформулировать общую тенденцию изменения НДС в гофрированной стенке при различных ее параметрах.

Для достоверного выявления НДС составных гофрированных балок в зависимости от угла наклона гофры, а также типа профиля было проведено

[1] *Добрачев В.М., Литвинов Е.В.* Аналитическое определение напряженно-деформированного состояния стенки-перемычки перфорированной балки // Известия вузов. Строительство. 2003. № 5 (533). С. 128–133.

[2] *Файнштейн А.С.* Стальные балки минимального веса. М. : Издательство Политехнического университета, 2007. 95 с.



a *b* *c*

Рис. 1. Наиболее распространенные профили гофрированных стенок: *a* — балки с треугольной гофрой; *b* — балки с трапециевидной гофрой; *c* — балки с волнистой гофрой [23]

Fig. 1. The most widely spread profiles of corrugated walls: *a* — beams having triangular corrugation; *b* — beams having trapezoidal corrugation; *c* — beams having wavy corrugation [23]

параметрическое численное моделирование работы балки с использованием программного комплекса ANSYS Mechanical APDL. На языке параметрического программирования APDL в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL реализован алгоритм параметрического изучения НДС с возможностью варьировать как геометрические, так и жесткостные параметры гофрированной балки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для численного параметрического исследования рассматривалась шарнирно-опертая балка двутаврового сечения с гофрированной стенкой в виде наиболее распространенных типов гофр: трапециевидной, волнистой и треугольной, для которых параметрически изменялся угол наклона гофры для выявления закономерностей изменения НДС и определения оптимальных параметров гофр различного типа.

Для параметрического анализа варьировался параметр угла наклона гофры α для каждого из типов гофр. Геометрические параметры балки базировались на размерах существующего стандартного прокатного двутавра 100Б4[3]. Высота балки принималась H = 1013 мм, ширина полки B = 320 мм, толщина стенки (гофр) T_g = 19,5 мм, толщина полок T_p = 32,5 мм. Варьировалась $H(\alpha)$ — высота гофры, зависимая от угла наклона гофры α. Параметр α (угол наклона гофры) изменялся в пределах $0 \le \alpha \le 90$ для трапециевидной и волнистой, и $0 \le \alpha \le 45$ для треугольной типов гофр. Длина ячейки гофры принималась постоянной L = 200 мм. Геометрические параметры гофрированной стенки и расчетная схема балки представлены на рис. 2, 3.

Материал балки — сталь с модулем упругости $E = 2{,}1 \times 10^5$ МПа, коэффициентом Пуассона ν = 0,3. Вертикальная нагрузка интенсивностью q = 2 МПа принималась равномерно распределенной по верхней полке балки. Собственный вес металлической балки не учитывался. Модель материала выбрана линейно-упругой.

Для численного моделирования принимался механический оболочечный конечный элемент с квадратичной функцией формы SHELL281, описывающий механические процессы в тонких и умеренно толстых оболочках с применением кинематических соотношений, соответствующих гипотезам теории оболочек с конечной сдвиговой жесткостью.

Кроме того, для численного моделирования будем полагать следующее:

1. Справедливо предположение о малости перемещений и поворотов оболочек по сравнению с толщиной (не учитываем в соотношениях Коши производные более высокого порядка).

2. Принимается линейная зависимость между компонентами тензора напряжений и деформаций (линейно-упругая модель материала).

3. Нормальный элемент срединного слоя после деформирования не остается перпендикулярным к поверхности осреднения, а поворачивается на некоторый угол, не искривляясь и не изменяя своей длины (кинематические гипотезы Миндлина – Рейсснера[4]).

4. Зона контакта элементов не учитывает технологические процессы в виде сварных швов.

5. Отдельные элементы балки (гофрированная стенка и полки) стыкуются между собой срединными поверхностями, образуя контакт в виде линии.

[3] ГОСТ 26020-83. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент.

[4] *Mindlin R.D.* Influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropic, elastic plates // Journal of Applied Mechanics. 1951. Vol. 18. No. 1. Pp. 31–38.

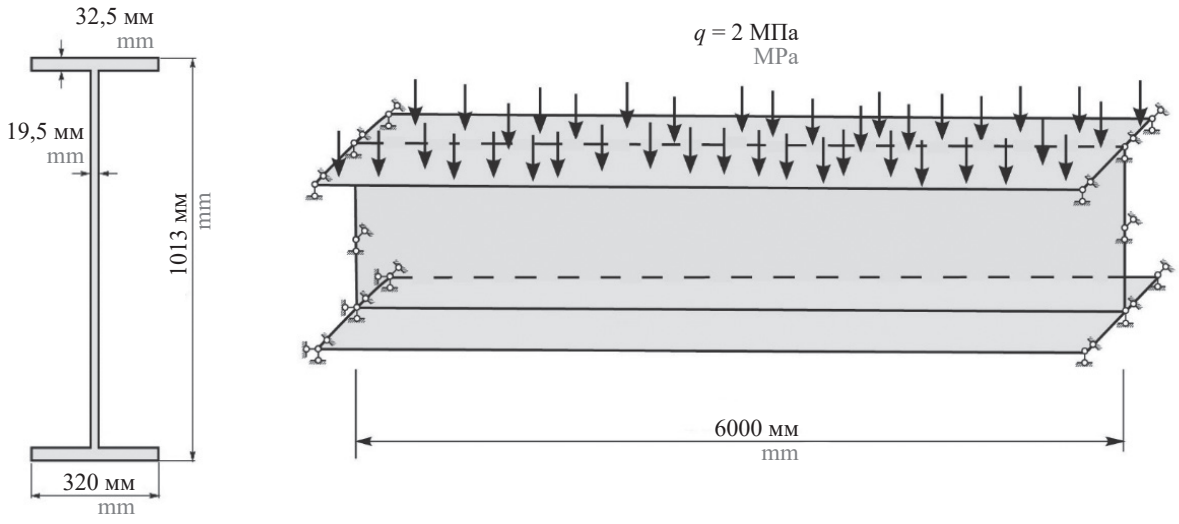


Рис. 2. Поперечное сечение (слева) и расчетная схема шарнирной балки с указанием граничных условий (справа)

Fig. 2. The cross section (left) and the design diagram of a hinged beam whose boundary conditions are specified (right)

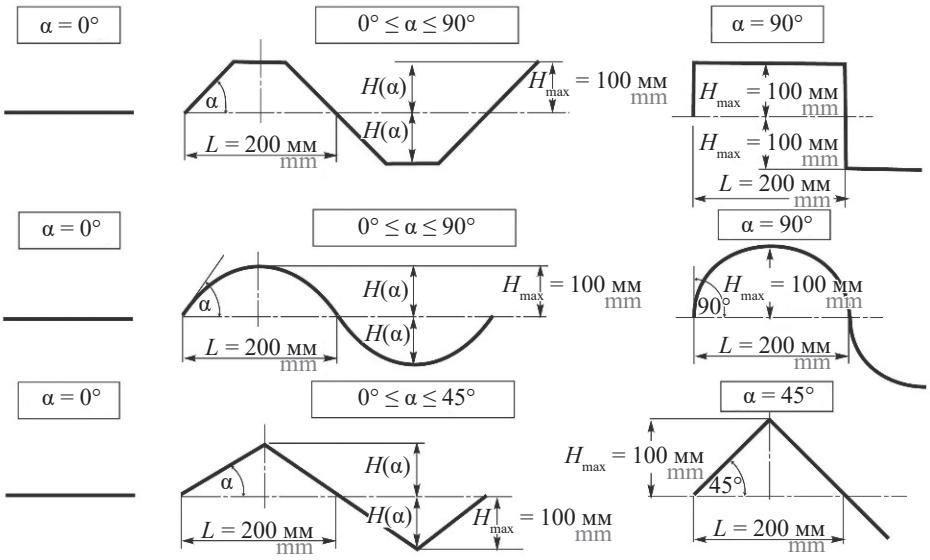


Рис. 3. Геометрические параметры различных вариантов гофр в зависимости от угла наклона гофры α

Fig. 3. Geometrical parameters of various types of corrugation depending on corrugation inclination angle α

6. Шарнирные условия опирания, реализованные посредством кинематических граничных условий по левой и правой граням двутавровой балки, представлены на рис. 2.

Оптимальный размер ячейки конечно-элементной сетки, который составил в среднем 25 мм для стенки и полок, принимался на основе изучения влияния сетки разбиения на результаты расчета. В качестве способа разбивки конечно-элементной сетки была принята свободная адаптивная четырехугольная сетка, которая подходит для разбивки сложной геометрии.

Для сопоставительного анализа изменения НДС гофрированных балок различных типов в качестве эталонного решения рассматривалась составная балка с прямой сплошной стенкой (традиционная модель), для которой будет соответствовать угол наклона гофры α = 0 (рис. 3) для всех вариантов расчетной модели (исходная точка моделирования).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приведем результаты параметрического исследования изменения НДС для различных видов гофр в зависимости от параметра угла наклона гофры α (рис. 4, 5).

Для проверки корректности получаемых результатов был выполнен подсчет наибольшего прогиба балки методом сопротивления материалов с учетом сдвиговой жесткости (теория изгиба балок Тимошенко[5]) при угле наклона гофры α = 0, что для всех вариантов различных типов гофр является исходной точкой моделирования. Согласно этому расчету, максимальный прогиб для балки на двух шарнирных опорах с геометрико жесткостными и нагрузочными параметрами, показанными на рис. 2, составляет u_z = 9,79 мм, что отличается от результатов численного моделирования (9,31 мм) примерно на 5 %.

Такие расхождения по перемещениям с результатами решения методом сопротивления материалов обуславливаются, на наш взгляд, следующими особенностями численной модели:

1. Особенностью статических и кинематических граничных условий для оболочечных элементов. Способ приложения давления к верхней полке не соответствует условиям задания нагрузки в сопротивлении материалов, которые предполагают наличие распределенной нагрузки на нейтральной оси балки. Условия формирования шарнирного закрепления в сопротивлении материалов также отличаются от используемых в расчетной модели.

2. Различной точностью используемых моделей: оболочек (численное решение основано на модели оболочек Миндлина – Рейсснера) и балок (решение сопротивления материалов основано на модели балок Тимошенко). Решение методом сопротивления материалов — приближенное, в то время как модели оболочек имеют более точную формулировку для описания прогиба реальных конструкций.

По итогам проведенных параметрических исследований для перемещений (рис. 4) можно сделать вывод о том, что при увеличении угла наклона гофры прогибы увеличиваются практически по параболическому закону, причем больший прогиб соответствует большему углу наклона гофры. Из сравнения между различными профилями гофры видно, что волнистая стенка — более предпочтительна и в среднем эффективней вариантов с трапециевидным и треугольным профилями гофр на 5 %, что является не очень значимой величиной.

Разница между прогибами балок с гофрированной стенкой и балок традиционного типа

[5] *Тимошенко С.П.* Сопротивление материалов. В 2-х т. М. : Наука, 1965.

со сплошной стенкой может быть вызвана меньшей изгибной жесткостью и меньшей способностью к перераспределению напряжений из-за формы гофр, которые при изгибе сминаются путем продольного складывания, так называемой «гармошки».

В целом на основании данных по перемещениям можно сделать вывод о том, что для рассматрива-

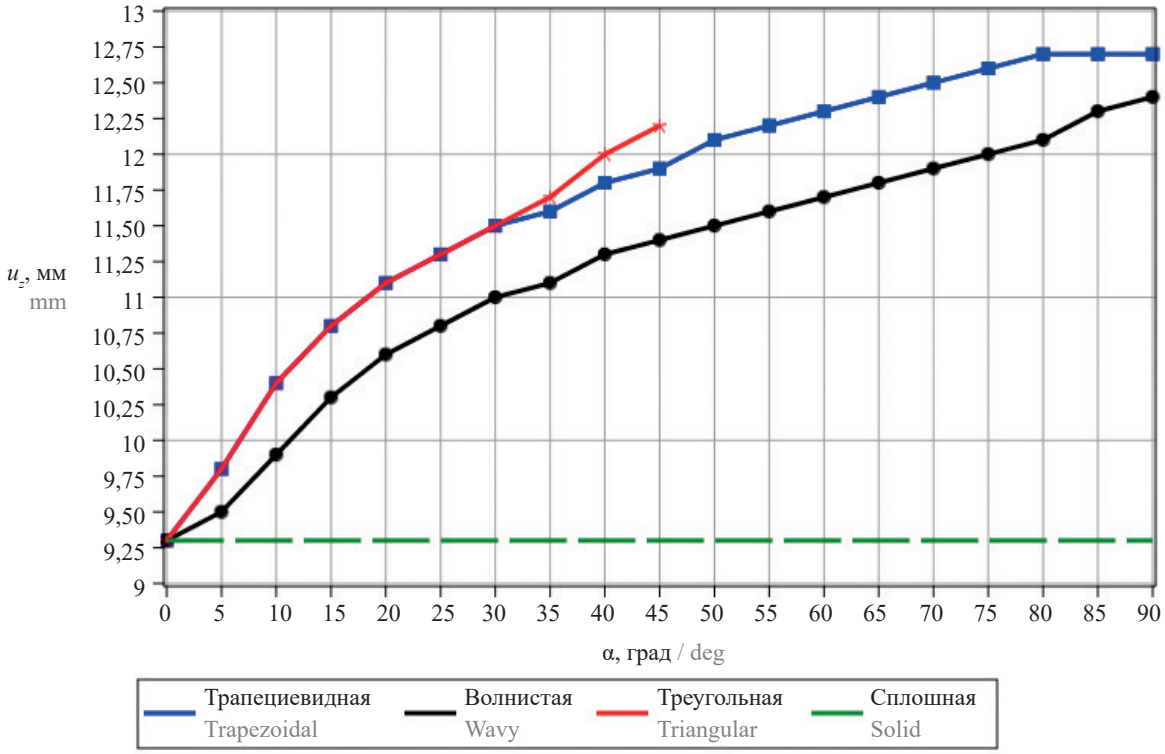


Рис. 4. График зависимости вертикальных перемещений u_z от угла наклона гофры α для различных профилей гофр

Fig. 4. The diagram demonstrating the dependence of vertical displacements u_z on corrugation inclination angle α for various corrugation profiles

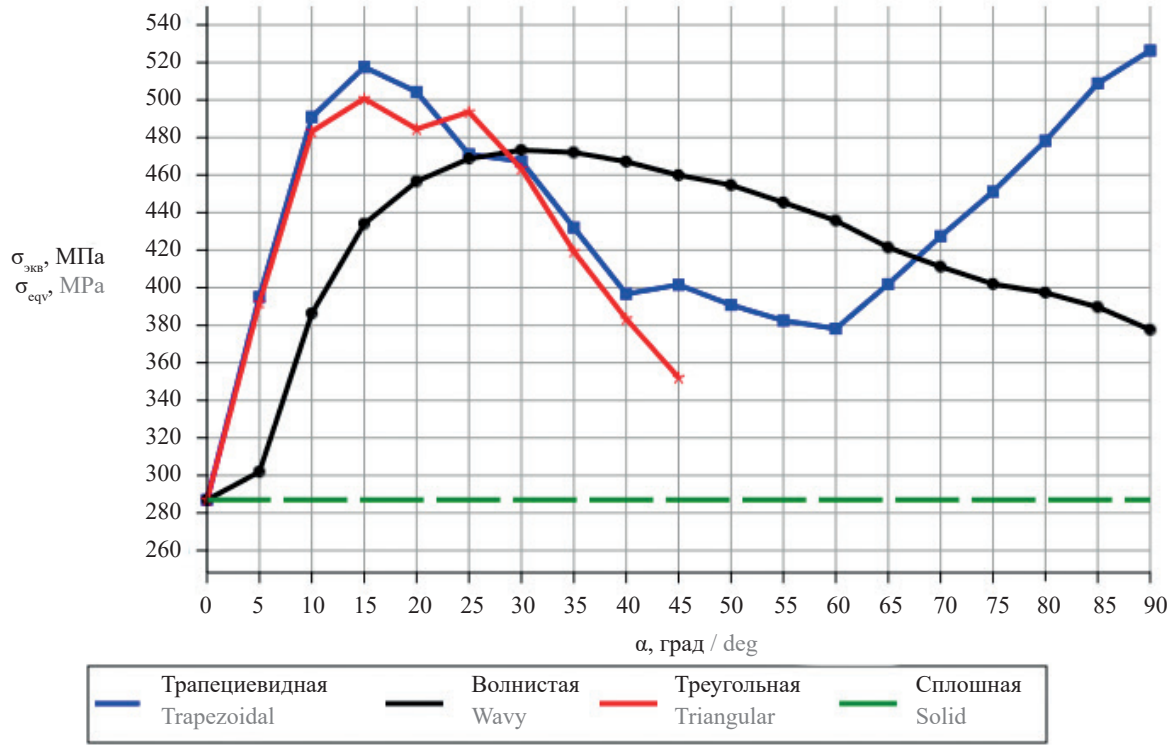


Рис. 5. График зависимости эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$ от угла наклона гофры α для различных профилей гофр

Fig. 5. The diagram demonstrating the dependence of equivalent stresses σ_{eqv} on corrugation inclination angle α for various corrugation profiles

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

емой постановки гофрированная стенка не увеличивает жесткость балки, а служит менее эффективным решением в сравнении с балками традиционного типа со сплошными стенками.

Рассмотрим результаты исследования напряжений. Для анализа напряженного состояния гофрированных балок, в дополнение к рис. 5, где представлен график зависимости эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$ от угла наклона гофры α для различных профилей гофр, приведем характерные изополя эквивалентных напряжений по энергетической теории прочности (теории Губера – Мизеса – Генки) для различных видов гофр для некоторых параметров угла наклона α (рис. 6–8). Выбор эквивалентных напряжений обусловлен фактом работы гофры в условиях сложного НДС, где значимый вклад в напряженное состояние вносят не только нормальные и касательные напряжения в вертикальной плоскости, как это имеет место в балках со сплошной стенкой в условиях плоского изгиба, но и другие компоненты тензора напряжений. По этой причине, рассмотрению напряженного состояния, на наш взгляд, подлежит именно переход к эквивалентным напряжениям, так как анализировать напряженное состояние только по компонентам нормальных и касательных напряжений, как это делается в работах[6] [17], не вполне корректно в виду неполноты изучения основ формирования напряженного состояния в сложносочлененных конструктивных схемах, таких как гофрированные балки.

По результатам проведенных параметрических исследований для эквивалентных напряжений (рис. 5), можно сделать вывод о том, что при увеличении угла наклона гофры напряжения увеличиваются, причем наибольшее значение эквивалентных напряжений соответствует малым значениям угла наклона гофры (10–25°). При дальнейшем увеличении угла наклона гофры, эквивалентные напряжения снижаются, за исключением варианта с трапециевидной гофрой, для которой изменение напряженного состояния в зависимости от угла наклона гофры снова увеличивается, начиная с 60°. При усредненном значении эквивалентных напряжений при различных углах наклона и типах гофры видно, что их величина составляет порядка 420–440 МПа, что примерно на 50 % больше аналогичных величин для балок со сплошной стенкой, что является значимым отличием в результатах.

Несмотря на неудовлетворительные результаты параметрического исследования напряженного состояния для гофрированных балок в сравнении с традиционными (со сплошной стенкой) (рис. 5), из изополей на рис. 6–8 очевидно, что максимальным напряжениям подвержены зоны концентрации напряжений, что подразумевает наличие пластических деформаций в зонах стыковки гофрированных стенок с полками.

При анализе напряжений не рассматриваются пластические зоны соединения полок со стенкой с концентрациями напряжений, для которых предполагается выполнить отдельное исследование, изучается только общее напряженное состояние, в частности, для зоны с действием наибольшего изгибающего момента. Из анализа общего напряженного состояния гофрированных балок с различными типами гофр видно, что эквивалентные напряжения для зон, свободных от концентрации напряжений, имеют числовые величины порядка 300–350 МПа, что больше аналогичных величин для балок традиционного типа со сплошными стенками. Причем наибольшие эквивалентные напряжения реализуются для гофрированных балок треугольного типа (порядка 350 МПа), в то время как для трапециевидного и волнистого типов эквивалентные напряжения снижаются и составляют 300–335 МПа.

Из результатов параметрических исследований НДС балок с различными типами гофр (в рамках допущений и условий, используемых в настоящей работе) можно сделать вывод, что гофрированные балки не позволяют получить выгоду в сравнении с традиционными вариантами балок со сплошными (прямыми) стенками, если судить по напряжениям и перемещениям.

Следует, однако, признать, что одним из преимуществ гофрированных балок является их повышенная способность к сохранению устойчивой формы изгиба по сравнению с балками традиционного типа со сплошными стенками[7] [18, 19]. Расчет на устойчивость строительных конструкций, а также их элементов — обязательный процесс при выполнении расчетных обоснований по обеспечению механической безопасности зданий и сооружений. В действительности в металлоконструкциях часто возникают проблемы потери устойчивости конструктивных систем, которые могут произойти раньше, чем потеря прочности.

В программном комплексе ANSYS Mechanical APDL оценка устойчивости конструкций возможна в предположении как линейно-упругой, так и нелинейной работы материала. Основная задача расчета на устойчивость конструкций состоит в определении числовой величины критического параметра потери устойчивости λ, для которого физический смысл заключается в установлении такой величины нагрузки, при которой произойдет потеря устойчивости.

[6] *Степаненко А.Н., Тишков Н.Л.* Рекомендации по расчету стальных балок покрытий зданий из двутавра с тонкой волнистой стенкой: учебное пособие / науч. ред. А.Д. Ловцов. Хабаровск : Изд-во ТОГУ, 2018. 60 с.

[7] *Аare И.И., Иднурм С.И.* Исследование работы стенки тонкостенной металлической балки после потери устойчивости от сдвига и изгиба // Труды Таллинского политехнического института. 1968. № 259. С. 15–28.

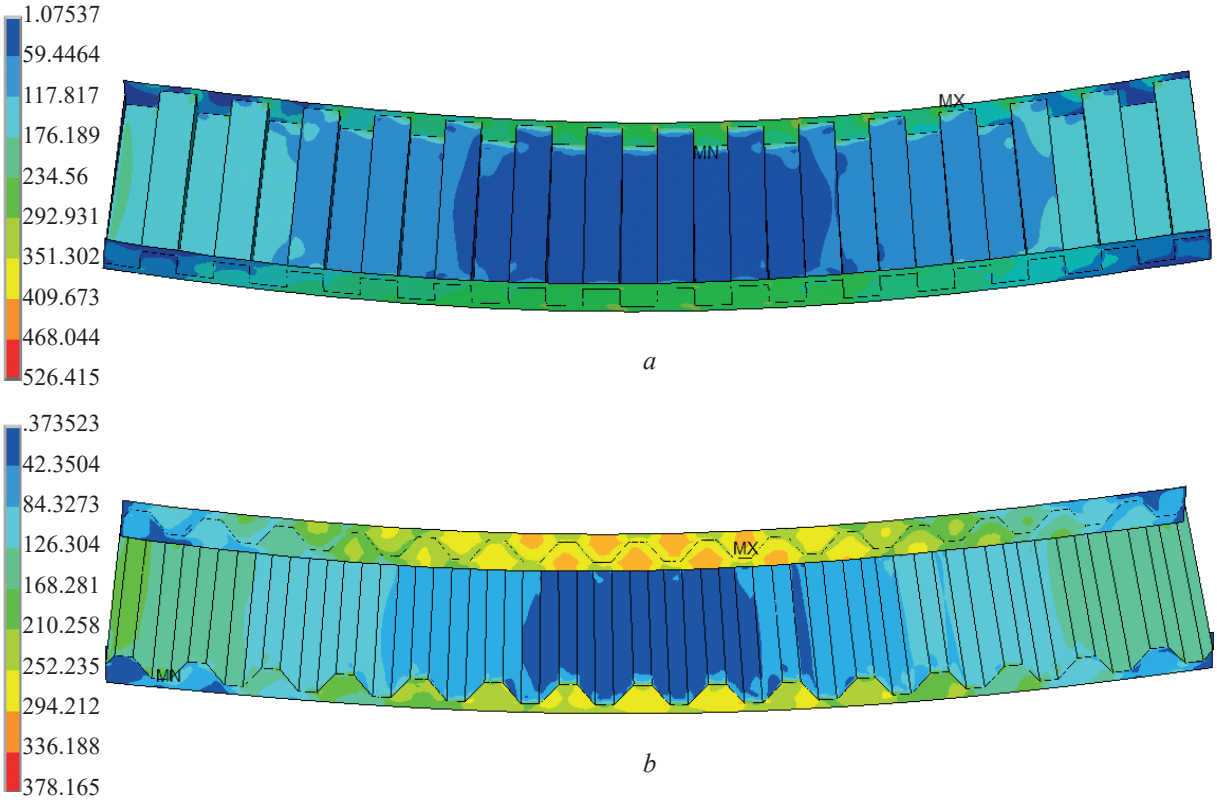


Рис. 6. Эквивалентные напряжения в гофрированных балках трапециевидного профиля при углах наклона гофры α = 90 (*a*) и 60 (*b*) градусов

Fig. 6. Equivalent stresses in corrugated trapezoidal beams at corrugation angles α = 90 (*a*) and 60 (*b*) degrees

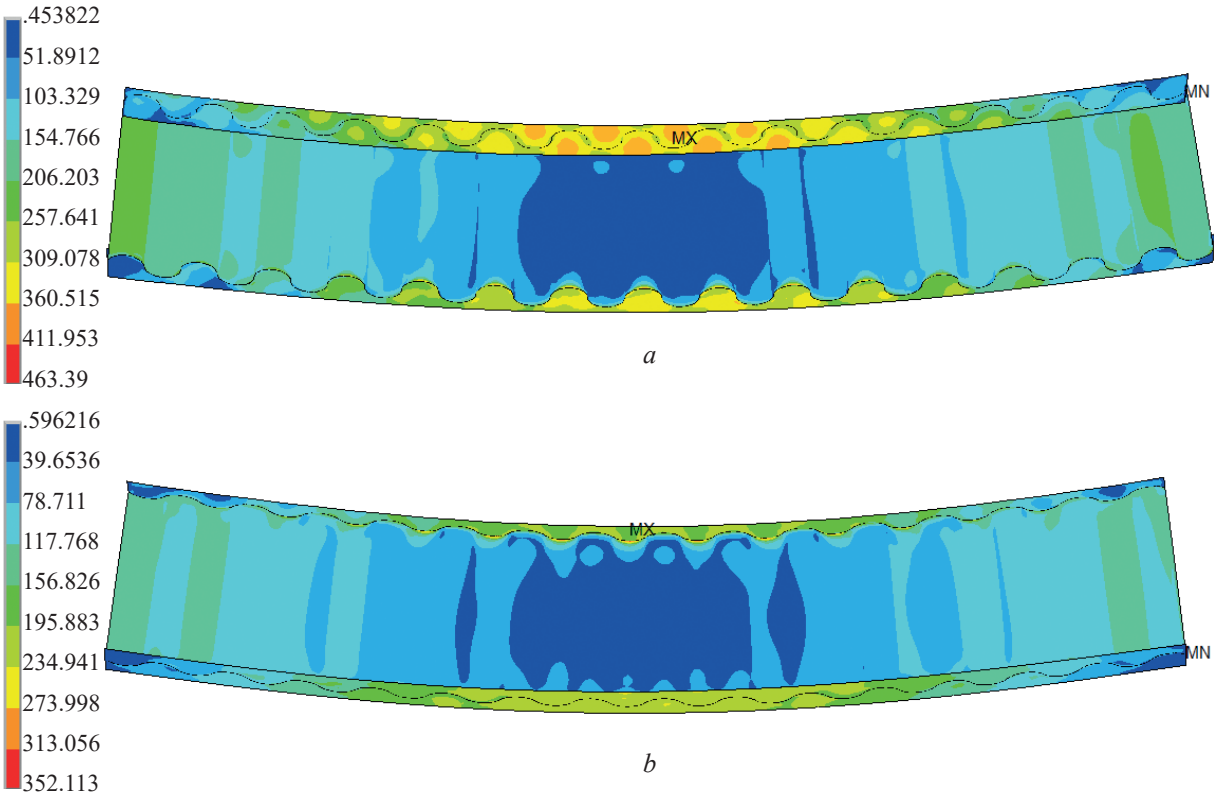


Рис. 7. Эквивалентные напряжения в гофрированных балках волнистого профиля при углах наклона гофры α = 90 (*a*) и 60 (*b*) градусов

Fig. 7. Equivalent stresses in corrugated beams, having a wavy profile, at corrugation angles α = 90 (*a*) and 60 (*b*) degrees

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

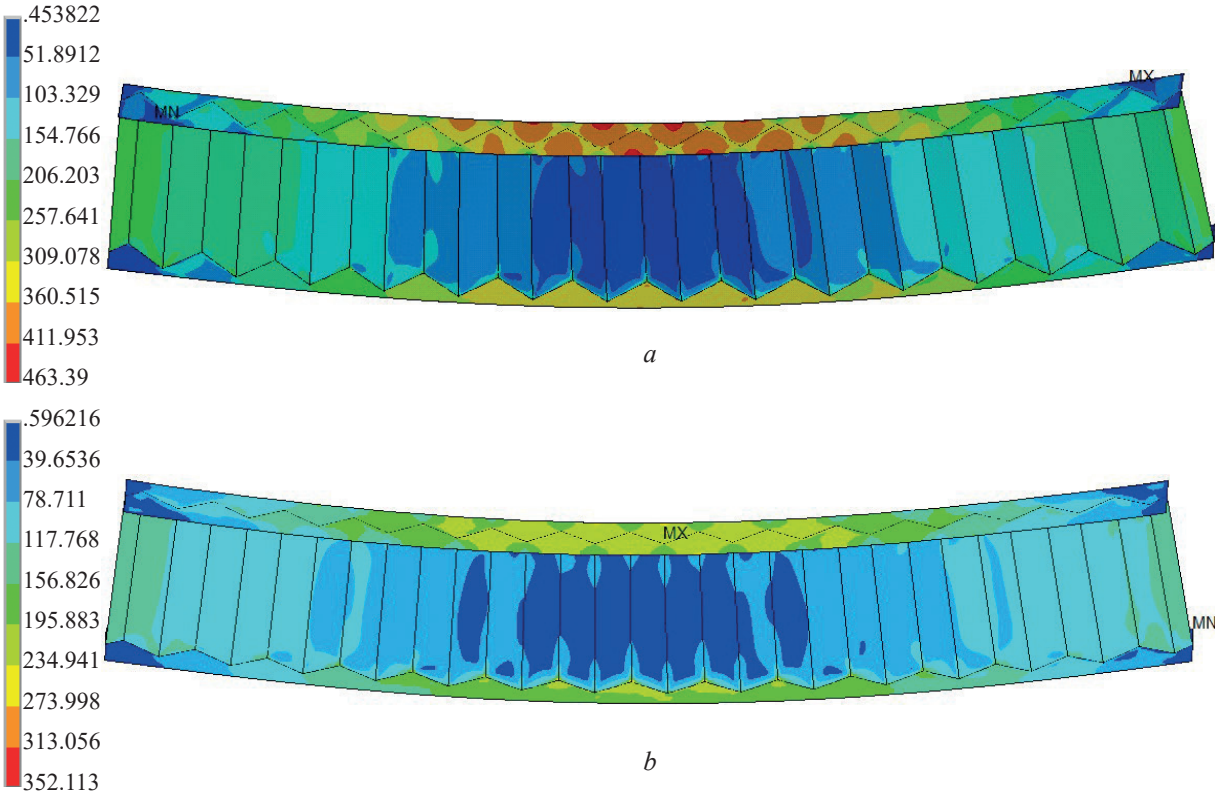


Рис. 8. Эквивалентные напряжения в гофрированных балках треугольного профиля при углах наклона гофры α = 45 (*a*) и 30 (*b*) градусов

Fig. 8. Equivalent stresses in corrugated triangular beams at corrugation angles α = 45 (*a*) and 30 (*b*) degrees

Для изучения устойчивости гофрированной стенки рассматривались балки с теми же геометрико-жесткостными и нагрузочными параметрами, что и в исследовании НДС. Для сопоставительного анализа изменения критического параметра потери устойчивости λ для гофрированных балок различных типов в качестве эталонного решения будем рассматривать составную балку с прямой стенкой (традиционная модель), для которой будет соответствовать угол наклона гофры α = 0 (рис. 3) для всех вариантов расчетной модели (исходная точка моделирования).

Приведем результаты параметрического анализа варьирования коэффициента потери общей устойчивости λ для различных типов гофр в зависимости от параметра угла наклона гофры α (рис. 9).

Как известно, наиболее частой формой потери общей устойчивости для изгибаемых элементов без дополнительных ребер жесткости является потеря устойчивости плоской формы изгиба. Покажем формы потери устойчивости балок с различными типами гофрированных стенок при наибольших параметрах угла наклона гофры α, а также традиционной балки со сплошной стенкой (рис. 10).

Как видно из результатов сопоставительного анализа (рис. 9), гофрированные балки имеют больший запас по устойчивости в сравнении с традиционными вариантами балок со сплошной стенкой. Причем запас по устойчивости значительный и увеличивается практически по линейному закону в зависимости от угла наклона гофры α. В сравнении эффективности различных видов гофр между собой видно, что трапециевидная и треугольная гофры являются более эффективными, в среднем на 12 %, и обладают большей жесткостью на кручение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании проведенных параметрических исследований НДС и устойчивости гофрированных балок можно сделать следующие выводы:

1. Гофрированная стенка не увеличивает жесткость балок на изгиб, а из-за своей формы стенка обладает меньшей способностью к перераспределению напряжений, что приводит к опасности смятия гофр путем продольного складывания, так называемой «гармошки».

2. В сравнении между различными профилями гофр по перемещениям, отличия получились незначительными, но в среднем волнистая гофра получилась эффективнее аналогичных с трапециевидной и треугольной гофрами.

3. Гофрированные балки более подвержены концентрации напряжений в локальных областях стыка стенки с гофрой, что подразумевает наличие пластических зон деформаций. Большей концентрации напряжений подвержены балки с трапециевидной и треугольной гофрами.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

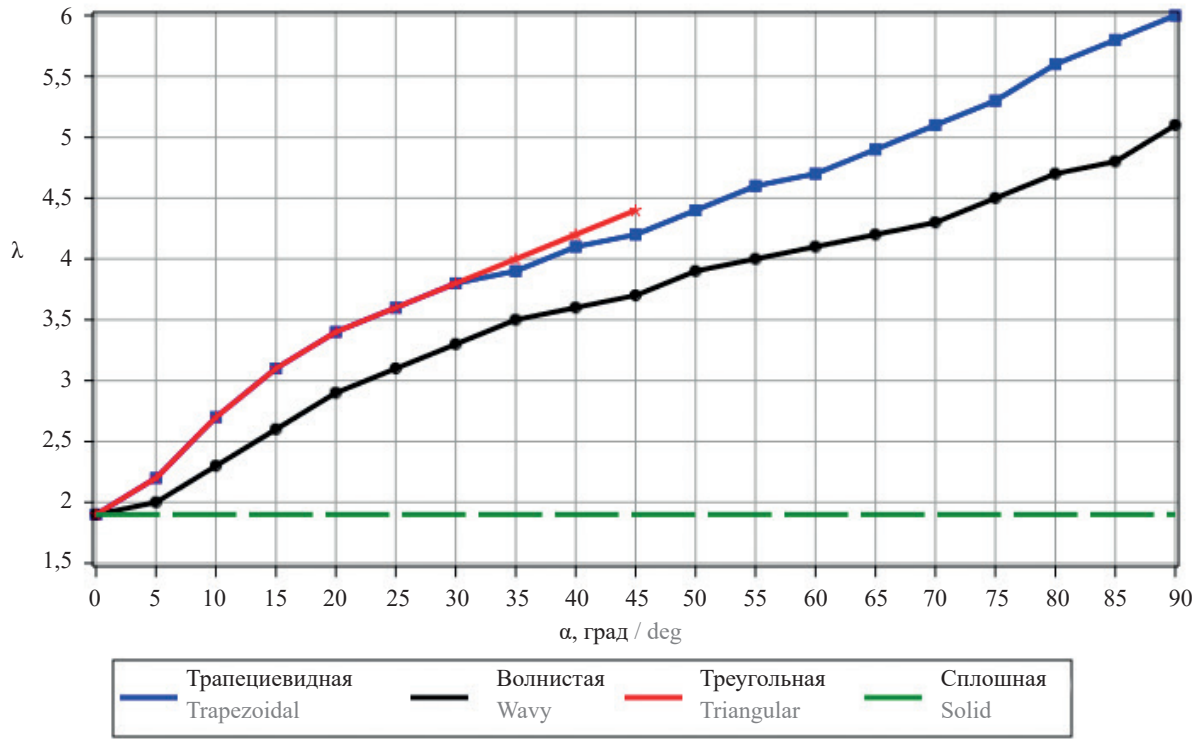


Рис. 9. График зависимости критического параметра коэффициента устойчивости λ от угла наклона гофры α для различных профилей гофр

Fig. 9. The diagram describing the dependence of the critical parameter of stability coefficient λ on corrugation inclination angle α for various corrugation profiles

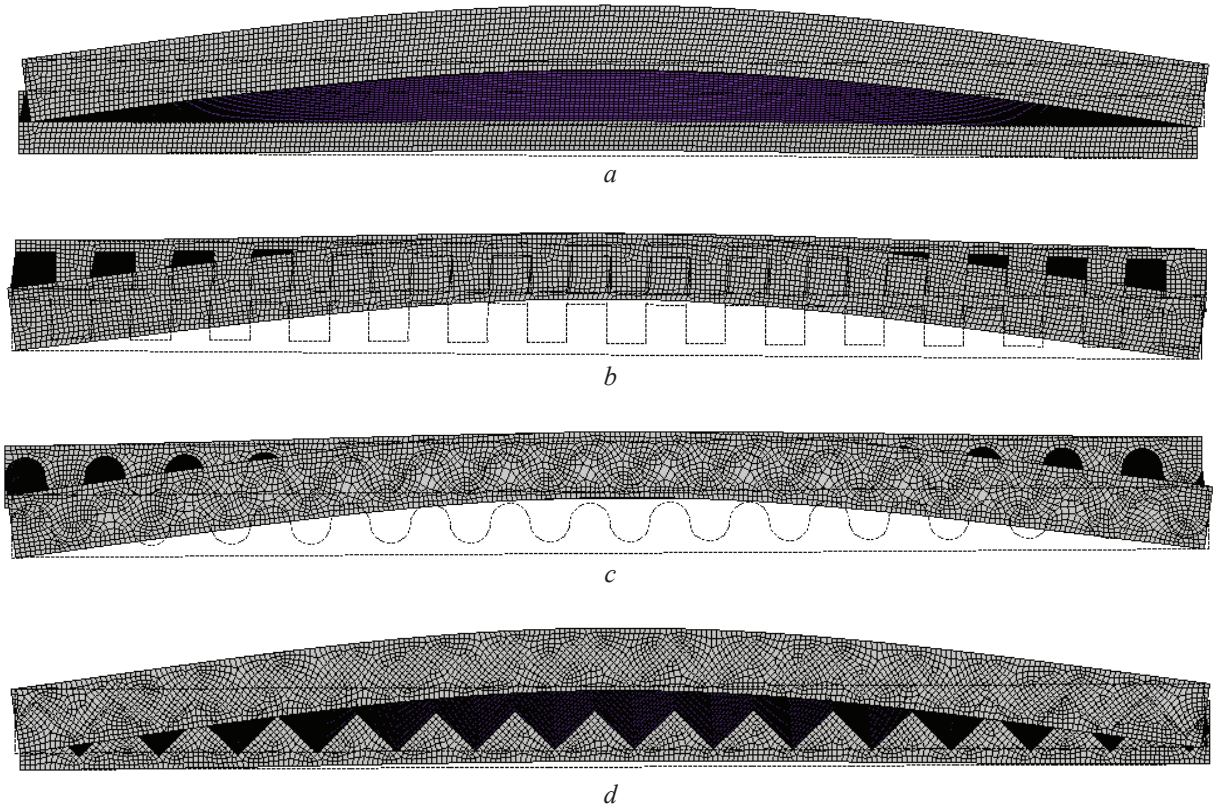


Рис. 10. Формы потери устойчивости для балок со сплошной (*a*); трапециевидной (*b*); волнистой (*c*); треугольной (*d*) стенкой

Fig. 10. Types of buckling for beams with solid (*a*); trapezoidal (*b*); wavy (*c*); triangular (*d*) walls

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

4. Без учета пластических зон с концентрациями напряжений в местах соединения полок со стенкой, в средних частях гофрированных балок можно наблюдать бóльшие значения эквивалентных напряжений в сравнении с традиционными балками со сплошной стенкой, что говорит о неэффективности гофрированных балок для восприятия напряжений.

5. Анализ форм потери устойчивости показал бóльшую эффективность гофрированных балок в сравнении с традиционными балками с плоской стенкой. Расчетный анализ продемонстрировал, что при увеличении угла наклона гофры α критический параметр коэффициента устойчивости λ увеличивается практически по линейному закону. При максимальных углах наклона гофры α коэффициент устойчивости λ в 2–3 раза больше коэффициента устойчивости λ для аналогичных балок со сплошной стенкой, что говорит о многократном росте жесткости на кручение гофрированных балок и их большей устойчивости по сравнению с балками традиционного типа.

6. Основные формы потери общей устойчивости у балок с гофрированной и сплошной стенкой практически совпадают, т.е. имеет место потеря устойчивости плоской формы изгиба.

7. Анализ эффективности различных профилей гофр по критическому параметру коэффициента устойчивости λ показал, что гофрированные балки с треугольной и трапециевидной стенкой обладают большим запасом по устойчивости, примерно на 12 %, чем аналогичные с волнистой стенкой, что свидетельствует о более высокой жесткости на кручение гофрированных балок с треугольной и трапециевидной гофрами.

8. При изгибе элементов конструкций с гофрированными стенками, прежде чем судить о преимуществах того или иного технического решения, следует провести всесторонний численный анализ конструкции по деформациям, напряжениям и устойчивости, а также быть готовым выполнить сложный численный анализ вблизи мест соединения полок со стенкой, включая расчеты на прочность узловых соединительных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Saiyan S.G., Paushkin A.G.* The stress state numerical study of a rectangular cross-section beam with round drillings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 913. P. 022049. DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022049

2. *Притыкин А.И.* Разработка методов расчета и конструктивных решений балок с однорядной и двухрядной перфорацией стенки : автореф. дис. … канд. техн. наук. Калининград, 2011. 331 с.

3. *Кузнецов И.Л., Пеньковцев С.А., Гимранов Л.Р.* Перфорированная балка с поясами из стальных профилей // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 1 (43). С. 129–135.

4. *Ганеман Г.А., Кикоть А.А.* Анализ металлических балок с перфорированной стенкой // Ползуновский альманах. 2017. № 4–2. С. 49–52.

5. *Притыкин А.И., Мисник А.В., Лаврова А.С.* Особенности расчета перфорированных балок МКЭ // Известия КГТУ. 2016. № 43. С. 249–259.

6. *Tsavdaridis K.D., D'Mello C.* Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes // Journal of Constructional Steel Research. 2011. Vol. 67. Issue 10. Pp. 1605–1620. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.04.004

7. *Eltaher M.A., Abdraboh A.M., Abdel rahman A.A., Kabeel A., Hendi A.A. Hendy* Free and forced analysis of perforated beams // Steel and Composite Structures. 2019. Vol. 31. Issue 5. Pp. 489–502. DOI: 10.12989/scs.2019.31.5.489

8. *Almitani K.H., Abdelrahman A.A., Eltaher M.A.* On forced and free vibrations of cutout squared beams // Steel and Composite Structures. 2019. Vol. 32. Issue 5. Pp. 643–655. DOI: 10.12989/scs.2019.32.5.643

9. *Bi R., Jia L., Li P., Wang Q.* Multiparameter seismic behavior of castellated beam-to-column connections based on stress migration // Structures. 2021. Vol. 29. Pp. 1137–1153. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.016

10. *Erfani S., Akrami V.* Evaluation of cyclic fracture in perforated beams using micromechanical fatigue model // Steel and Composite Structures. 2016. Vol. 20. Issue 4. Pp. 913–930. DOI: 10.12989/scs.2016.20.4.913

11. *Tsavdaridis K.D., D'Mello C.* Vierendeel bending study of perforated steel beams with various novel web opening shapes through nonlinear finite-element analyses // Journal of Structural Engineering. 2012. Vol. 138 (10). Pp. 1214–1230. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000562

12. *Филатов В.В.* Расчет сквозных балок по теории составных стержней А.Р. Ржаницына // Вестник МГСУ. 2013. № 9. С. 23–31. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.9.23-31

13. *Кузин В.Н., Фролов К.А.* Балка с гофрированной стенкой // Аллея Науки. 2018. Т. 1. № 8 (24). С. 134–139.

14. *Бондаренко О.С., Кикоть А.А.* Анализ балок с гофрированной стенкой // Ползуновский альманах. 2016. № 3. С. 38–41.

15. *Дмитриева Т.Л., Уламбаяр Х.* Сравнительный анализ балок с гофрированной стенкой по от-

ношению к балкам с прямой стенкой // Актуальные проблемы развития строительной отрасли : мат. Междунар. научно-практ. конф. Иркутск, 2017. С. 43–51.

16. *Митрофанов С.В., Митрофанов В.А.* Работа балки с гофрированной стенкой с различными профилями гофрирования // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 9 (61). С. 87–92.

17. *Лукин А.О.* Определение нормальных напряжений в поперечных сечениях балок с гофрированной стенкой // Научный электронный архив. 2021.

18. *Брянцев А.А., Абсиметов В.Э.* Этапы планирования проведения испытания балок с гофрированной стенкой, ослабленных технологическими отверстиями // Наука и инновации в строительстве : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова). Белгород, 2018. С. 24–42.

19. *Кацеф В.И.* Балки с тонкой гофрированной стенкой как инструмент повышения эффективности строительства // Молодой ученый. 2019. № 28 (266). С. 55–57.

20. *Elamary A., Saddek A.B., Alwetaishi M.* Effect of corrugated web on flexural capacity of steel beams // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. Pp. 470–481.

21. *Al-Kannoon M.A., Suhiel I.A.* Experimentally Flexural Behaviour Study of Steel Beams with Corrugated Webs // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 888. P. 012084. DOI: 10.1088/1757-899X/888/1/012084

22. *Arunakanthi E., Veera Praveen Reddy P.* Analysis of trapezoidal corrugated steel web beams with different angle of inclination by ANSYS // International Journal of Advanced Science and Technology. 2020. Vol. 29 (3). Pp. 3413–3426.

23. *Лукин А.О., Шевцов И.А.* Классификация балок с гофрированной стенкой // Вопросы технических наук: новые подходы в решении актуальных проблем : сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. Нижний Новгород, 2015. С. 46–50.

24. *Saiyan S., Paushkin A.* Parametric study of the stress state of beams with round holes in pure bending // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1015. Issue 1. P. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/1015/1/012014

25. *Saiyan S., Paushkin A.* Application of the theory of strength of materials to determine the shear stresses in beams with round holes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. P. 012076. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012076

Поступила в редакцию 22 марта 2021 г.
Принята в доработанном виде 21 мая 2021 г.
Одобрена для публикации 2 июня 2021 г.

Об авторах: **Сергей Гургенович Саиян** — магистрант кафедры сопротивления материалов, инженер Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 987238, Scopus: 57195230884, ORCID: 0000-0003-0694-4865; Berformert@gmail.com;

Александр Глебович Паушкин — кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 680780; alexglebov@bk.ru.

REFERENCES

1. Saiyan S.G., Paushkin A.G. The stress state numerical study of a rectangular cross-section beam with round drillings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 913:022049. DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022049

2. Pritykin A.I. *Development of calculation methods and design solutions for beams with single-row and double-row wall perforation : author. dis. ... cand. tech. sciences*. Kaliningrad, 2011; 331. (rus.).

3. Kuznetsov I.L., Penkovcev S.A., Gimranov L.R. Perforated girders with perforated of steel profiles. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2018; 1(43):129-135. (rus.).

4. Ganeman G.A., Kikot' A.A. Analysis of perforated wall metal beams. *Polzunovsky almanac.* 2017; 4-2:49-52. (rus.).

5. Pritykin A.I., Misnik A.V., Lavrova A.S. Features of the calculation of perforated beams FEM. *KSTU News*. 2016; 43:249-259. (rus.).

6. Tsavdaridis K.D., D'Mello C. Web buckling study of the behaviour and strength of perforated steel beams with different novel web opening shapes. *Journal of Constructional Steel Research*. 2011; 67(10):1605-1620. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.04.004

7. Eltaher M.A., Abdraboh A.M., Abdel rahman A.A., Kabeel A., Hendi A.A. Hendy Free and forced analysis of perforated beams. *Steel and Compos-*

ite Structures. 2019; 31(5):489-502. DOI: 10.12989/scs.2019.31.5.489

8. Almitani K.H., Abdelrahman A.A., Eltaher M.A. On forced and free vibrations of cutout squared beams. *Steel and Composite Structures.* 2019; 32(5):643-655. DOI: 10.12989/scs.2019.32.5.643

9. Bi R., Jia L., Li P., Wang Q. Multiparameter seismic behavior of castellated beam-to-column connections based on stress migration. *Structures*. 2021; 29:1137-1153. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.016

10. Erfani S., Akrami V. Evaluation of cyclic fracture in perforated beams using micromechanical fatigue model. *Steel and Composite Structures*. 2016; 20(4):913-930. DOI: 10.12989/scs.2016.20.4.913

11. Tsavdaridis K.D., D'Mello C. Vierendeel bending study of perforated steel beams with various novel web opening shapes through nonlinear finite-element analyses. *Journal of Structural Engineering.* 2012; 138(10):1214-1230. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000562

12. Filatov V.V. Calculation of open-frame through beams according to the A.R. Rzhanitsyn's theory of compound rods. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 9:23-31. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.9.23-31 (rus.).

13. Kuzin V.N., Frolov K.A. Corrugated beam. *Alley of Science*. 2018; 8(24):134-139. (rus.).

14. Bondarenko O.S., Kikot' A.A. Corrugated beams analysis. *Polzunovsky almanac*. 2016; 3:38-41. (rus.).

15. Dmitrieva T.L., Ulambayar H. The use of beams with corrugated wall in a modern design. *Actual Problems of Development of the Construction Industry: Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Irkutsk, 2017; 43-51. (rus.).

16. Mitrofanov S.V., Mitrofanov V.A. The work of beams with corrugated web with different corrugation profiles. *Construction and Industrial Safety*. 2017; 9(61):87-92. (rus.).

17. Lukin A.O. Determination of normal stresses in cross-sections of beams with a corrugated web. *Scientific Electronic Archive*. 2021. (rus.).

18. Bryancev A.A., Absimetov V.E. Stages of planning testing of corrugated-wall beams weakened by technological holes. *Science and Innovations in Construction: collection of reports of the International Scientific and Practical Conference (to the 165th anniversary of the birth of V.G. Shukhov).* Belgorod, 2018; 24-42. (rus.).

19. Kacef V.I. Beams with a thin corrugated wall as a tool for increasing the efficiency of construction. *Young Scientist*. 2019; 28(266):55-57. (rus.).

20. Elamary A., Saddek A.B., Alwetaishi M. Effect of corrugated web on flexural capacity of steel beams. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017; 12:470-481.

21. Al-Kannoon M.A., Suhiel I.A. Experimentally flexural behaviour study of steel beams with corrugated webs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020; 888:012084. DOI: 10.1088/1757-899X/888/1/012084

22. Arunakanthi E., Veera Praveen Reddy P. Analysis of trapezoidal corrugated steel web beams with different angle of inclination by ANSYS. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020; 29(3):3413-3426.

23. Lukin A.O., Shevcov I.A. Classification of corrugated web beams. *Questions of technical sciences: new approaches to solving urgent problems: collection of scientific papers on the results of the international scientific and practical conference*. Nizhny Novgorod, 2015; 46-50. (rus.).

24. Saiyan S., Paushkin A. Parametric study of the stress state of beams with round holes in pure bending. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2021; 1015(1):012014. DOI: 10.1088/1757-899X/1015/1/012014

25. Saiyan S., Paushkin A. Application of the theory of strength of materials to determine the shear stresses in beams with round holes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030:012076. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012076

Received March 22, 2021.
Adopted in revised form on May 21, 2021.
Approved for publication on June 2, 2021.

Bionotes: **Sergey G. Saiyan** — master of the Department of Strength of Materials, engineer of the Scientific Research Center for computer modeling of unique buildings, structures and complexes named after A.B. Zolotov (SRC CM named after A.B. Zolotov); **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 987238, Scopus: 57195230884, ORCID: 0000-0003-0694-4865; Berformert@gmail.com;

Alexander G. Paushkin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Strength of Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 680780; alexglebov@bk.ru.

УДК 691 DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.688-697

Многофункциональный слоистый композиционный материал строительного назначения

А.Н. Гуменюк, И.С. Полянских, С.М. Петрунин, Ф.Е. Шевченко, Г.Н. Первушин
Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (ИжГТУ имени М.Т. Калашникова); г. Ижевск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В последние десятилетия проводится изучение регулирования электротехнических свойств материалов гидратационного твердения. Отмечается, что при изменении данных свойств различными добавками возникают негативные эффекты: низкая коррозионная стойкость, снижение физико-механических свойств. Цель исследования — разработка многофункционального слоистого материала с локализированными электропроводящими характеристиками. Решается задача установления влияния модификаторов при их использовании в качестве регулирующих компонентов электротехнических свойств на разрабатываемый состав.

Материалы и методы. Для изготовления образцов применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н; заполнитель — песок с модулем крупности 0,7; молотая техническая сера 9998 сорта (ГОСТ 127.1-93), суспензия технической сажи, нитрат кальция. Определены удельные сопротивления отдельных слоев композиционного материала, механические свойства и особенности структуры каждого слоя и структура контактных слоев.

Результаты. Установлено, что использование предварительно обработанной технической серы в количестве 7 % от массы вяжущего способствует формированию токоизолирующего слоя с удельным сопротивлением на 28 сутки 29,57 кОм · см. Электропроводящий слой, сформированный посредством введения технической сажи в количестве 7 % от массы вяжущего, позволяет обеспечить стабильное прохождение электрического тока. Определено, что нитрат кальция оказывает влияние на морфологию вторичных кристаллогидратов и аморфной фазы минеральной матрицы на основе портландцемента и дает возможность обеспечить требуемую прочность бетона.

Выводы. Послойное формование предложенных составов способствует формированию композиционных материалов с регулируемыми электротехническими характеристиками на основе портландцемента без дополнительного применения диэлектриков. Подтверждена эффективность использования технической серы, комплексного модификатора на основе технической сажи и нитрата кальция в качестве модификаторов минеральной матрицы, позволяющих регулировать электротехнические характеристики искусственного камня.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: удельное электрическое сопротивление, нитрат кальция, цементный бетон, соединения серы, многофункциональные материалы, техническая сажа, дисперсные модификаторы, электрофизические характеристики

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Ижевского государственного технического университета им. Калашникова в рамках гранта № ПИА/20-67-04.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Гуменюк А.Н., Полянских И.С., Петрунин С.М., Шевченко Ф.Е., Первушин Г.Н.* Многофункциональный слоистый композиционный материал строительного назначения // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 6. С. 688–697. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.688-697

Multifunctional layered composite material used for construction purposes

Alexander N. Gumeniuk, Irina S. Polyanskikh, Semen M. Petrunin, Filipp E. Shevchenko, Grigory N. Pervushin
Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU); Izhevsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The adjustability of electrical properties of materials, that have hydraulic setting characteristics, has been studied over the last decades. It is emphasized that any change in electrical properties, triggered by various additives, causes negative side effects, including low corrosive resistance and modified physical and mechanical characteristics. The purpose of this research is to design a multifunctional layered material that features localized electrical conductivity. The objective is to track the influence of modifiers, capable of regulating electrical properties.

Materials and methods. Samples were made of Portland cement I 42.5; the cement, having the fineness modulus of 0.7, was used as the aggregate; samples also contained ground Sulphur type 9998 (GOST 127.1-93), soot slurry, and calcium nitrate. The co-authors have identified the unit resistance values of each layer of this composite material, mechanical properties and features of each layer, and the structure of contact layers.

Results. The co-authors have determined that the addition of pre-treated Sulphur in the amount of 7 % of the binder mass facilitates the formation of a nonconductive layer, whose unit resistance reaches 29.57 kiloohm cm on the 28th day. The

© А.Н. Гуменюк, И.С. Полянских, С.М. Петрунин, Ф.Е. Шевченко, Г.Н. Первушин, 2021
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

conductive layer, generated by adding soot in the amount of 7 % of the binder mass, ensures the stable passage of electric current. The co-authors have identified that calcium nitrate influences the morphology of secondary crystalline hydrates and the non-crystalline phase of the mineral matrix, made of Portland cement, and it also ensures the required concrete strength.

Conclusions. The layered method of formation of new compositions allows to make composite materials having adjustable electrical characteristics. New materials are made of Portland cement, and they contain no non-conductors. The co-authors have proven the efficiency of Sulphur, an integrated modifier made of soot and calcium nitrite, used as the modifiers of the mineral matrix, since they regulate the electrical properties of the artificial stone.

KEYWORDS: electrical resistivity, calcium nitrate, concrete made of Portland cement, sulfur compounds, multifunctional materials, soot, dispersed modifiers, electrophysical characteristics

Acknowledgements. The research was performed with the financial support from the Kalashnikov Izhevsk State Technical University within the framework of Grant No. PIA/20-67-04.

FOR CITATION: Gumeniuk A.N., Polyanskikh I.S., Petrunin S.M., Shevchenko F.E., Pervushin G.N. Multifunctional layered composite material used for construction purposes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(6):688-697. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.688-697 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы композиционные материалы с регулируемыми электротехническими свойствами обладают потенциалом применения в качестве тензометрических датчиков деформации конструктивных элементов зданий и сооружений, а также в качестве нагревательных элементов бетонов дорожного назначения, при формировании покрытий взлетно-посадочных полос и рулежных дорожек в аэропортах в целях предотвращения оледенения и скопления снега [1–5].

Интерес к ним также обусловлен актуальностью использования подобных композиционных материалов в области строительства, электроэнергетики и в иных отраслях. Стабильное направленное токоограничение в виде локализации электротехнических свойств композиционных материалов строительного назначения позволит расширить область применения многофункциональных минеральных матриц [4, 5].

С момента открытия токопроводящих бетонов они в основном применялись как ограждающие конструкции зданий, электромагнитные отражатели излучения для защиты от помех, а также в виде электропроводящих бетонов для обогрева внутренних помещений без дополнительных нагревательных элементов [6]. Отмечается [7, 8], что применение добавок, повышающих электропроводность, может привести к снижению физико-механических свойств композиции. При этом в исследовании [9] доказано, что суспензии технической сажи производства ООО «Новый дом» способствуют достаточно равномерному распределению электропроводящего компонента, что обеспечивает стабильность электропроводящих свойств [10].

Определенный интерес вызывает оценка протекания различных видов коррозии на изменения электропроводящих свойств минеральной матрицы. В обзорном исследовании Karla Hornbostel [7] удельное сопротивление бетона представлено как наиболее важный параметр оценки стойкости материала к электрохимической коррозии. Кроме того, в работах [7, 8] установлена взаимосвязь между скоростью протекания электрохимической и сульфатной коррозии и удельным сопротивлением бетона, заключающаяся в уменьшении скорости коррозии при увеличении удельного сопротивления бетона. В некоторых трудах [10–12] также подтверждена зависимость скорости электрохимической коррозии от величины удельного сопротивления композиционного материала.

Учитывая основные достоинства и недостатки электропроводящего бетона, важной становится разработка композиций, способных одновременно воспринимать механические и электрические нагрузки [6, 13, 14]. Использование электропроводящих композиционных материалов на основе портландцемента ограничено их высокой скоростью электрохимической деструкции. В связи с этим определено следующее направление исследований, заключающееся в изучении возможности создания композиционных бетонов с повышенными электроизоляционными свойствами [15]. В публикациях [16–18] было указано, что при водонасыщении бетона происходит растворение реакционно-активных компонентов минеральной матрицы, вследствие чего минеральная матрица становится полупроводником с низким удельным сопротивлением.

Для предотвращения данного процесса предлагаются различные технологические подходы [5, 14], например формирование материала с более плотной упаковкой элементов минеральной матрицы. Доказано [16], что оптимальных показателей при создании бетонов с электроизоляционными свойствами возможно добиться путем пропитки капиллярно-пористого материала водными битумными эмульсиями. Также во многих работах [19–21] отмечены диэлектрические свойства такого материала, как техническая сера. Установлено [22–24], что серобетон и модифицированные с помощью технической серы искусственные минеральные матрицы обладают защитными свойствами от электромагнитного воздействия [22], что, в свою очередь, подтверждается

исследованиями основных свойств серы [19, 20], вследствие чего можно сделать вывод о диэлектрических свойствах данного материала. Это позволяет предположить возможность [25] регулирования удельного сопротивления искусственного камня посредством введения серы на стадии изготовления смеси с последующей термоактивацией [26].

В настоящей статье приводится технология направленного регулирования электротехнических свойств композиционных материалов строительного назначения, а также методика измерения электропроводности многофункционального слоистого материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — многофункциональные композиционные материалы на основе модифицированного портландцемента. Предмет исследования — влияние модификаторов на основе дисперсных техногенных отходов на электротехнические свойства композиционного материала и оценка возможности локализации электротехнических свойств.

В работе в качестве вяжущего материала применялся портландцемент типа 42,5 CEM I со следующим составом:

- химический состав цемента: CaO — 66,73 %; SiO_2 — 23,22 %; Al_2O_3 — 5,16 %; Fe_2O_3 — 4,42 %; SO_3 — 0,47 %;
- минералогический состав цемента: C_3S — 65 %; C_2S — 13 %; C_3A — 4 %; C_4AF — 18 %.

Удельная поверхность вяжущего составляла 380 м^2/кг, нормальная густота цементного теста 25,5 %, начало/конец схватывания 165/215 мин. В качестве заполнителя применялся сухой фракционированный песок с характеристиками: фракция, мм/модуль крупности (ГОСТ 8736-2014) — 0–1,25/0,7; влажность — не более 0,3 %; содержание пылевидных глинистых частиц — не более 5 %; содержание глины в комках — не более 0,5 %; содержание органических примесей — нет; содержание посторонних засоряющих примесей — нет; насыпная плотность — 1500 кг/м^3.

Электропроводящий компонент

В целях повышения электропроводящих свойств использовалась суспензия технической сажи производства ООО «Новый дом». Оптимальное количество добавки определено авторами в предыдущих исследованиях [9]. Техническая сажа выпускается в виде пигментного концентрата, в состав которого входят: сажа — 62 %; вода — 20 %; гликоль — 10 %, специальные добавки — 8 %.

Изолирующий компонент

Для локализации электротехнических свойств и повышения коррозионной стойкости композиционного материала использована сера 9998 сорта, соответствующая ГОСТ 127.1-93, оптимальное количество серы определено авторами в работе [26]. Основные физико-механические и физико-химические свойства технической серы: форма частиц — полусферическая; насыпная плотность — 1,3 г/см^3; массовая доля серы — 99,99 %; массовая доля золы — 0,005 %; массовая доля органических веществ — 0,005; массовая доля воды — 0,01 %. Для повышения смачиваемости и равномерного распределения мелкодисперсных частиц в объеме композиционного материала проводилась предварительная многостадийная обработка технической серы. Дисперсный модификатор смешивался с органическим растворителем в соотношении 1:3, затем подвергался механохимическому воздействию фрезой при 1500 оборотах в минуту в лабораторном диссольвере в течение 40 минут.

Изготовление образцов

С целью послойного формования образца и измерения электротехнических свойств предложена схема с установкой измерительных электродов (рис. 1).

Оптимальное количество сажи и технической серы определено на основании предыдущих исследований [9, 26]. Изготовление композиционных

Табл. 1. Компонентный состав изготавливаемых образцов

Table 1. The composition of specimens

Состав Composition	Портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н Portland cement, CEM I 42.5 H	Кварцевый песок Quartz sand	Сажа, % Soot, %	Техническая сера, % Sulfur, %	Нитрат кальция, % Calcium nitrate, %	П/Ц P/C	В/Ц W/C	Марка подвижности бетонной смеси Concrete mix workability grade
Токоизолирующий слой Conductive layer	800	1600	—	7	—	0,07	0,4	Пк2 (5,1 см) Pk2 (5.1 cm)
Электропроводящий слой Nonconductive layer			7	—	3	—	0,4	Пк2 (5,4 см) Pk2 (5.4 cm)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

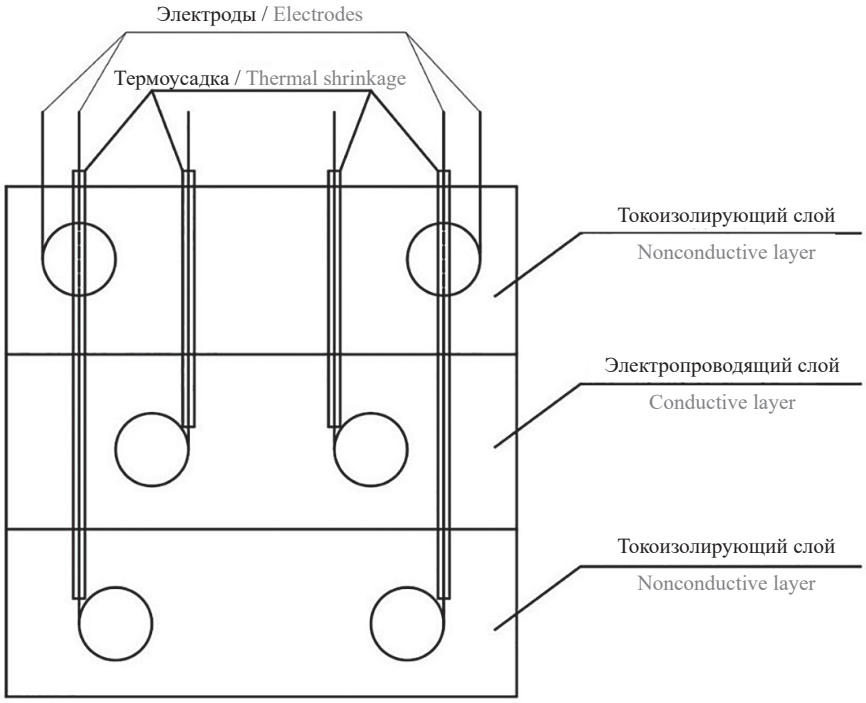


Рис. 1. Схема послойного формования образца и расположение электродов для измерения удельного сопротивления
Fig. 1. The layered sample formation pattern and the position of electrodes needed to measure electrical resistivity

образцов осуществлялось на основе двух различных экспериментальных составов, представленных в табл. 1.

Электропроводящий слой изготавливался на основе портландцемента с введением 7 % сажи и 3 % нитрата кальция от массы вяжущего.

Токоограничивающий слой изготавливался на основе портландцемента с добавкой 7 % технической серы от массы вяжущего.

В целях уменьшения возможности межслоевого смешивания в процессе формования установлено водоцементное соотношение, равное 0,4, выбран метод укладки и уплотнения смеси.

Образцы изготавливались из теста нормальной густоты, послойно заливались в формы размерами 70 × 70 × 70 мм. Хранение образцов в формах производилось в течение 48 ч во влажных условиях, затем выполнялась распалубка, образцы подвергались температурной обработке по режиму: изотермическая выдержка при 180 °С в течение 1 ч, затем 2 ч охлаждение до 35–40 °С. В дальнейшем образцы выдерживались во влажных условиях. Физико-механические испытания проводились на 7, 14 и 28 сутки, физико-химические исследования — на 28 сутки твердения.

Методы исследования

Определение подвижности бетонной смеси производилось в соответствии с ГОСТ 28013-98 и определялось по измеряемой в сантиметрах глубине погружения в нее эталонного конуса в соответствии с методикой по ГОСТ 5802-86.

Температурная обработка осуществлялась в универсальной пропарочной камере КУП-1.

Исследование механической прочности на сжатие проводилось с использованием гидравлического пресса ПГМ-100МГ4А.

Для определения изменения электропроводности слоев и удельного сопротивления применялся прибор МНИПИ Е7-20. Значение измеряемых параметров определяется расчетным путем и отображается на дисплее в омах (Ом, Ω). Удельное сопротивление устанавливали по формуле [14]:

$$\rho = R\frac{A}{L},\ \Omega\cdot\text{см},$$

где ρ — удельное сопротивление образца; R — сопротивление образца; A — площадь поперечного сечения; L — расстояние между зондами.

Определение характера микроструктуры выполнено с помощью сканирующих электронных микроскопов Thermo Fisher Scientific Quattro S и Tescan Mira3 XMU. Съемка на Thermo Fisher Scientific Quattro S проводилась в режиме низкого вакуума при 20 кВ, без напыления, при давлении 50 Па, с шагом увеличения ×5000, при этом съемка на Tescan Mira3 XMU производилась при 20 кВ, с напылением золота, с шагом увеличения ×5000.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ результатов физико-механических испытаний разработанного состава с токоизолирующим слоем (содержание технической серы 7 %) и электропроводящим слоем (содержание сажи 7 %

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6. 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6. 2021

и нитрата кальция 3 %) показал стабильный прирост прочностных параметров с течением времени, значения прочности на сжатие и изгиб в контрольные сроки испытаний соответствуют марочным характеристикам используемого вяжущего, что позволяет говорить об отсутствии негативного влияния предложенных добавок и послойного формирования образцов на физико-механические характеристики композиции. В частности, прочность цементно-песчаного раствора на 28 сутки без добавок, согласно используемой марке портландцемента, должна составлять не менее 24 МПа в соответствии с ГОСТ Р 58272-2018. При этом прочность слоистого композиционного материала на 28 сутки составила 30,8 МПа (рис. 2).

В последующем, согласно схеме, представленной на рис. 1, определялось удельное сопротивление отдельных слоев композиционного материала, в результате удельное сопротивление электропроводящего слоя на 28 сутки составило 5,7 кОм · см, электроизолирующего слоя — 29,57 кОм · см (рис. 3). Значительная разница удельных сопротивлений проводящего и непроводящего слоев позволяет говорить о локализации электротехнических свойств и ограничивающем эффекте токоизолирующего слоя.

Для выявления характера изменения микроструктуры материала в зависимости от используемых функциональных добавок анализировалась структура композиции при разных увеличениях.

На снимках (рис. 4) представлена морфология новообразований поверхности скола композиционного материала. Приведена структура электроизолирующего слоя, модифицированного технической серой (рис. 4, *a*). Исходя из анализа структуры, можно судить о том, что продукты термической активации

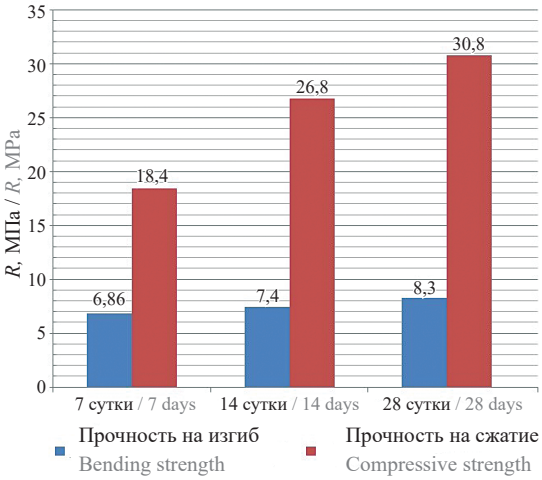


Рис. 2. Характер изменения прочности слоистого композиционного материала на основе портландцемента (значение коэффициента вариации при определении прочности образцов составило $V = 6{,}5$ %)

Fig. 2. A change in the strength of the layered composite material made of Portland cement (the value of the coefficient of variation was $V = 6.5$ % when the strength of samples was measured)

технической серы формируют плотную полимерцементную матрицу, которая обладает повышенными диэлектрическими свойствами [21, 26].

Микроструктура электропроводящего слоя (рис. 4, *b*) характеризуется аморфно-кристаллической структурой. При этом распределение частиц сажи и плотная упаковка новообразований позволяет матрице проводящего слоя демонстрировать высокую и стабильную электропроводность, ограничивающим фактором которой становится равномерность распределения добавки, дисперсность

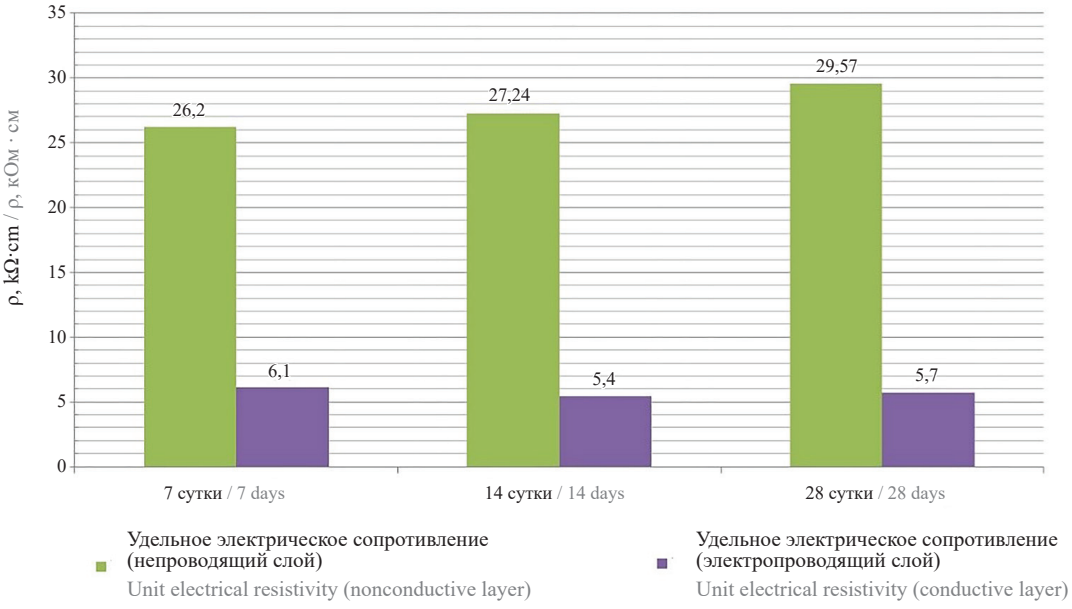
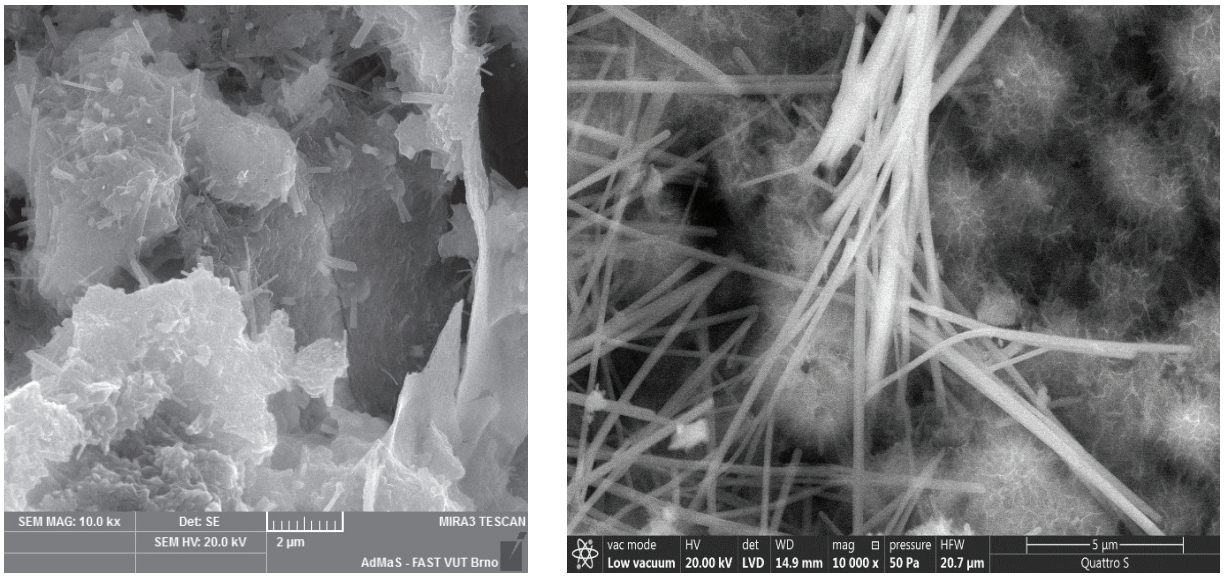


Рис. 3. Изменение удельного сопротивления слоев композиционного материала

Fig. 3. A change in the electrical resistivity of the layers of the composite material

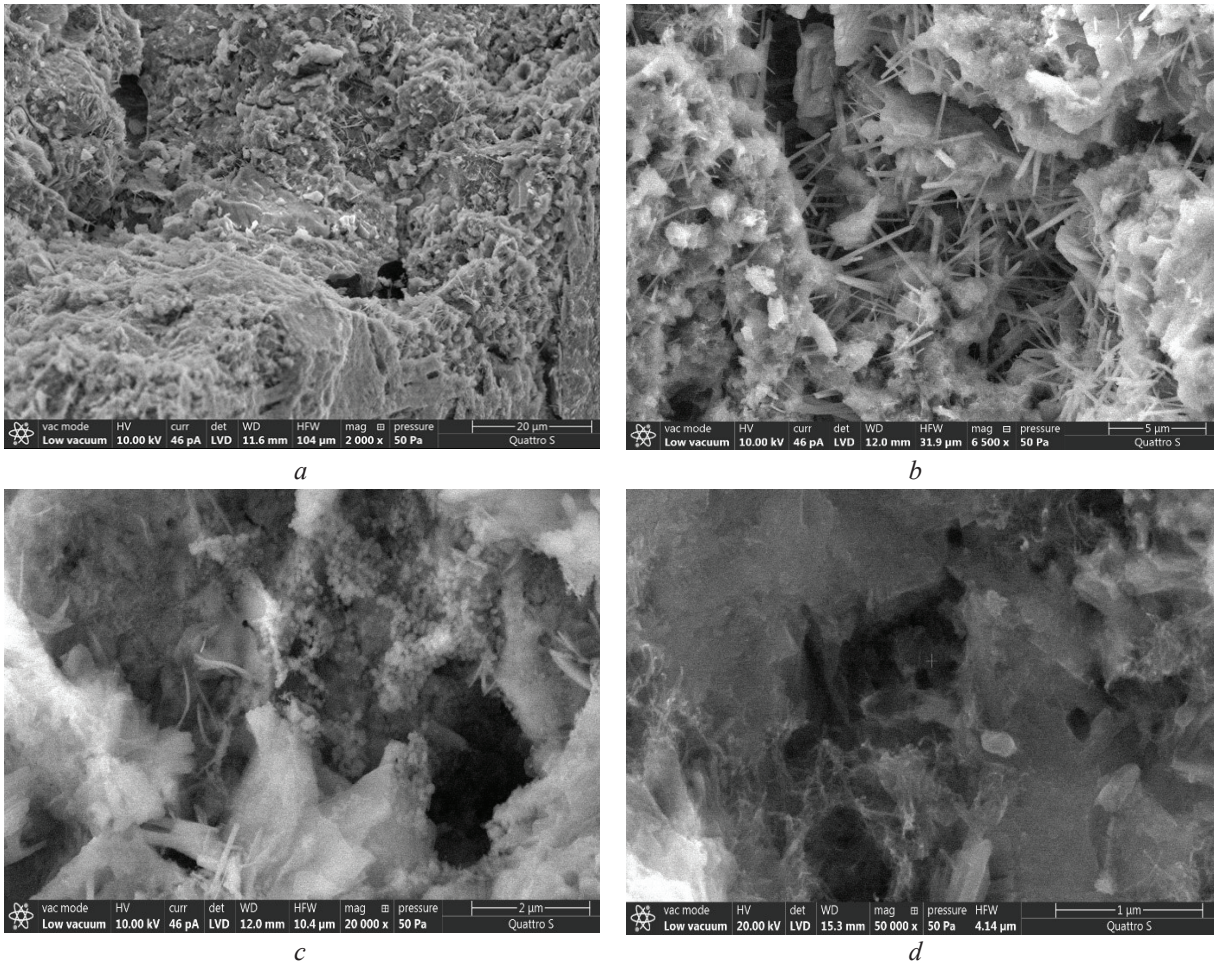
Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021



a *b*

Рис. 4. Микроструктура композиционного образца на 28 сутки твердения, полученная при 10 000-кратном увеличении: *a* — токоизолирующий слой; *b* — токопроводящий слой

Fig. 4. The microstructure of samples on the 28th day of setting at the 10,000x magnification: *a* — non-conductive layer; *b* — conductive layer



a *b*

c *d*

Рис. 5. Микроструктура контактного слоя композиционного образца на 28 сутки твердения, полученная при: *a* — 2000-кратном; *b* — 5000-кратном; *c* — 20 000-кратном; *d* — 50 000-кратном увеличении

Fig. 5. The microstructure of the contact layer of the sample on the 28th day of setting at the following magnification values: *a* — 2,000x; *b* — 5,000x; *c* — 20,000x and *d* — 50,000x

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

и удельное сопротивление модифицирующего компонента.

На снимках (рис. 5) представлена область, соответствующая границе слоев, анализируя которую можно сделать вывод о равномерности формирования структуры, отсутствии концентраторов напряжений, что позволяет обеспечить требуемые механические характеристики как отдельным слоям, так и композиционному материалу в целом.

Таким образом, данные исследований электротехнических и механических свойств полностью подтверждают возможность направленного регулирования и локализации электротехнических свойств композиционного материала строительного назначения за счет применения термопластичного отхода техногенного происхождения и суспензии сажи, которое можно обеспечить без снижения физико-технических характеристик материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании экспериментальных исследований механических и электротехнических свойств композиционного материала можно сделать следующие выводы:

• введение технической серы и сажи в качестве регуляторов электротехнических свойств не приводит к снижению механической прочности композиционного материала, при этом введение нитрата кальция снижает степень закристаллизованности структуры минеральной матрицы на поздних этапах набора прочности;

• использование предложенных модификаторов позволяет сформировать многослойный материал с различной степенью проводимости слоев. Электропроводящий слой обеспечивает стабильное прохождение электрического тока на частотах более 100 кГц, при этом токоизолирующий слой обеспечивает электроизоляцию, что подтверждается высоким удельным сопротивлением на 28 сутки 29,57 кОм · см. Разница в удельном сопротивлении между слоями составляет 23,87 кОм · см.

Полученные результаты могут быть использованы для расширения номенклатуры выпускаемых материалов и изделий с регулируемыми электротехническими характеристиками. При этом определенные аспекты и механизмы, лежащие в основе возникновения устойчивых электротехнических свойств, а также особенности формирования контактной границы слоев с позиции оценки сроков эксплуатации требуют детального объяснения и дополнительных экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Wang H., Yang J., Liao H., Chen X.* Electrical and mechanical properties of asphalt concrete containing conductive fibers and fillers // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 122. Pp. 184–190. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.063

2. *Sassani A., Ceylan H., Kim S., Arabzadeh A., Taylor P.C., Gopalakrishnan K.* Development of carbon fiber-modified electrically conductive concrete for implementation in Des Moines International Airport // Case Studies in Construction Materials. 2018. Vol. 8. Pp. 277–291. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.02.003

3. *Wu J., Liu J., Yang F.* Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 75. Pp. 129–135. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.004

4. *El-Dieb A.S., El-Ghareeb M.A., Abdel-Rahman M.A.H., Nasrd E.S.A.* Multifunctional electrically conductive concrete using different fillers // Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 15. Pp. 61–69. DOI: 10.1016/j.jobe.2017.10.012

5. *Rovnaník P., Kusák I., Bayer P., Schmid P., Fiala L.* Electrical and self-sensing properties of alkali-activated slag composite with graphite filler // Materials. 2019. Vol. 12. Issue 10. P. 1616. DOI: 10.3390/ma12101616

6. *Dong W., Huang Y., Lehane B., Aslania F., Ma G.* Mechanical and electrical properties of concrete incorporating an iron-particle contained nano-graphite by-product // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 270. P. 121377. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121377

7. *Hornbostel K., Larsen C.K., Geiker M.R.* Relationship between concrete resistivity and corrosion rate — A literature review // Cement and Concrete Composites. 2013. Vol. 39. Pp. 60–72. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019

8. *El-Dieb A.S., El-Ghareeb M.A., Abdel-Rahman M.A.H., Nasr E.S.A.* Multifunctional electrically conductive concrete using different fillers // Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 15. Pp. 61–69. DOI: 10.1016/j.jobe.2017.10.012

9. *Yakovlev G., Vít Č., Polyanskikh I., Gordina A., Pudov I., Gumenyuk A., Smirnova O.* The effect of complex modification on the impedance of cement matrices // Materials. 2021. Vol. 14. Issue 3. P. 557. DOI: 10.3390/ma14030557

10. *Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Urkhanova A.A., Lkhasaranov S.A., Ardashova G.R., Fediuk R.S. et al.* Mechanical and electrical properties of concrete modified by carbon nanoparticles // Magazine of Civil Engineering. 2019. Vol. 8 (92). Pp. 163–172. DOI: 10.18720/MCE.92.14

11. *Sassani A., Ceylan H., Kim S., Gopalakrishnan K., Arabzadeh A., Taylor P.C.* Influence of mix

design variables on engineering properties of carbon fiber-modified electrically conductive concrete // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 152. Pp. 168–181. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.172

12. *Anwar M.S., Suitha B., Vedalakshmi R.* Lightweight cementitious conductive anode for impressed current cathodic protection of steel reinforced concrete application // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 71. Pp. 167–180. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.032

13. *Wu T., Huang R., Chi M., Weng T.* A study on electrical and thermal properties of conductive concrete // Computers and Concrete. 2013. Vol. 12. Issue 3. Pp. 337–349. DOI: 10.12989/cac.2013.12.3.337

14. *Dehghanpour H., Yilmaz K., Ipek M.* Evaluation of recycled nano carbon black and waste erosion wires in electrically conductive concretes // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 221. Pp. 109–121. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.025

15. *Ribeiro D., Labrincha J., Morelli M.* Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete // Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42. Issue 1. Pp. 124–133. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.09.002

16. *Demircilioğlu E., Teomete E., Schlangen E., Baeza F.J.* Temperature and moisture effects on electrical resistance and strain sensitivity of smart concrete // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 224. Pp. 420–427. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.091

17. *Денисюк И.Ю., Успенская М.В., Фокина М.И., Логушкова К.Ю.* Электропроводящая композиция бетона // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 1. С. 158–162. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-158-162

18. *Sobolkina A., Mechtcherine V., Khavrus V., Maier D., Mende M., Ritschel M. et al.* Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix // Cement and Concrete Composites. 2012. Vol. 34. Issue 10. Pp. 1104–1113. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.07.008

19. *Менковский М.А., Яворский В.Т.* Технология серы. М. : Химия, 1985. 327 с.

20. *Халиуллин А.К.* Химия серы. М. : Стройиздат, 1995. 170 с.

21. *Патуроев В.В.* Полимербетоны. М. : Стройиздат, 1987. 285 с.

22. *Королев Е.В., Киселев Д.Г., Прошина Н.А., Альбакасов А.И.* Теплофизические свойства серных строительных материалов // Вестник МГСУ. 2011. № 8. С. 249–253.

23. *Fediuk R., Amran Y.H.M., Mosaberpanah M.A., Danish A., El-Zeadani M., Klyuev S.V. et al.* A critical review on the properties and applications of sulfur-based concrete // Materials. 2020. Vol. 13. Issue 21. P. 4712. DOI: 10.3390/ma13214712

24. *Lewandowski M., Kotynia R.* Assessment of sulfur concrete properties for use in civil engineering // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 219. P. 03006. DOI: 10.1051/matecconf/201821903006

25. *Bernatskii A.F.* Electrical insulating concrete. Properties, technology, application // Concrete and reinforced concrete in the third millennium: proceedings of the international scientific and practical conference. 2000. Pp. 81–89.

26. *Gumeniuk A., Hela R., Polyanskikh I., Gordina A., Yakovlev G.* Durability of concrete with man-made thermoplastic sulfur additive // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. Pp. 032012. DOI: 10.1088/1757-899X/869/3/032012

Поступила в редакцию 29 апреля 2021 г.
Принята в доработанном виде 7 июня 2021 г.
Одобрена для публикации 7 июня 2021 г.

Об авторах: **Александр Николаевич Гуменюк** — ассистент кафедры строительных материалов, механизации и геотехники, Институт строительства и архитектуры имени В.А. Шумилова; **Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (ИжГТУ имени М.Т. Калашникова)**; 426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7; SPIN-код: 6196-8655; ResearcherID: AAH-1846-2021; Scopus: 57204363802; ORCID: 0000-0002-2880-8103; aleksandrgumenyuk2017@yandex.ru;

Ирина Сергеевна Полянских — кандидат технических наук, доцент кафедры строительных материалов, механизации и геотехники, Институт строительства и архитектуры имени В.А. Шумилова; **Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (ИжГТУ имени М.Т. Калашникова)**; 426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7; РИНЦ ID: 604708, Scopus: 56789978800, ResearcherID: M-7100-2015, ORCID: 0000-0003-1331-9312; irina_maeva@mail.ru;

Семен Михайлович Петрунин — студент бакалавриата кафедры строительных материалов, механизации и геотехники, Институт строительства и архитектуры имени В.А. Шумилова; **Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (ИжГТУ имени М.Т. Калашникова)**; 426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7; petryninofficial@yandex.ru;

Филипп Евгеньевич Шевченко — аспирант кафедры строительных материалов, механизации и геотехники, Институт строительства и архитектуры имени В.А. Шумилова; **Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (ИжГТУ имени М.Т. Калашникова)**; 426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7; РИНЦ ID: 1093846, gism56@mail.ru;

Григорий Иванович Первушин — доктор технических наук, профессор, директор Института строительства и архитектуры имени В.А. Шумилова; **Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (ИжГТУ имени М.Т. Калашникова)**; 426069, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7; РИНЦ ID: 406144, Scopus: 8731311800; ORCID:0000-0002-7070-2855; gism@istu.ru.

REFERENCES

1. Wang H., Yang J., Liao H., Chen X. Electrical and mechanical properties of asphalt concrete containing conductive fibers and fillers. *Construction and Building Materials*. 2016; 122:184-190. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.063

2. Sassani A., Ceylan H., Kim S., Arabzadeh A., Taylor P.C., Gopalakrishnan K. Development of carbon fiber-modified electrically conductive concrete for implementation in Des Moines International Airport. *Case Studies in Construction Materials.* 2018; 8:277-291. DOI: 10.1016/j.cscm.2018.02.003

3. Wu J., Liu J., Yang F., Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing. *Construction and Building Materials.* 2015; 75:129-135. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.004

4. El-Dieb A.S., El-Ghareeb M.A., Abdel-Rahman M.A.H., Nasrd E.S.A. Multifunctional electrically conductive concrete using different fillers. *Journal of Building Engineering.* 2018; 15:61-69. DOI: 10.1016/j.jobe.2017.10.012

5. Rovnaník P., Kusák I., Bayer P., Schmid P., Fiala L. Electrical and self-sensing properties of alkali-activated slag composite with graphite filler. *Materials*. 2019; 12(10):1616. DOI: 10.3390/ma12101616

6. Dong W., Huang Y., Lehane B., Aslania F., Ma G. Mechanical and electrical properties of concrete incorporating an iron-particle contained nano-graphite by-product. *Construction and Building Materials.* 2021; 270:121377. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121377

7. Hornbostel K., Larsen C.K., Geiker M.R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate — A literature review. *Cement and Concrete Composites.* 2013; 39:60-72. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019

8. El-Dieb A.S., El-Ghareeb M.A., Abdel-Rahman M.A.H., Nasr E.S.A. Multifunctional electrically conductive concrete using different fillers. *Journal of Building Engineering.* 2018; 15:61-69. DOI: 10.1016/j.jobe.2017.10.012

9. Yakovlev G., Vít Č., Polyanskikh I., Gordina A., Pudov I., Gumenyuk A., Smirnova O. The effect of complex modification on the impedance of cement matrices. *Materials.* 2021; 14(3):557. DOI: 10.3390/ma14030557

10. Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Urkhanova A.A., Lkhasaranov S.A., Ardashova G.R., Fediuk R.S. et al. Mechanical and electrical properties of concrete modified by carbon nanoparticles. *Magazine of Civil Engineering*. 2019; 8(92):163-172. DOI: 10.18720/MCE.92.14

11. Sassani A., Ceylan H., Kim S., Gopalakrishnan K., Arabzadeh A., Taylor P.C. Influence of mix design variables on engineering properties of carbon fiber-modified electrically conductive concrete. *Construction and Building Materials.* 2017; 152:168-181. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.172

12. Anwar M.S., Suitha B., Vedalakshmi R. Lightweight cementitious conductive anode for impressed current cathodic protection of steel reinforced concrete application. *Construction and Building Materials*. 2014; 71:167-180. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.032

13. Wu T., Huang R., Chi M., Weng T. A study on electrical and thermal properties of conductive concrete. *Computers and Concrete.* 2013; 12(3):337-349. DOI: 10.12989/cac.2013.12.3.337

14. Dehghanpour H., Yilmaz K., Ipek M. Evaluation of recycled nano carbon black and waste erosion wires in electrically conductive concretes. *Construction and Building Materials.* 2019; 221:109-121. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.025

15. Ribeiro D., Labrincha J., Morelli M. Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42(1):124-133. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.09.002

16. Demircilioğlu E., Teomete E., Schlangen E., Baeza F.J. Temperature and moisture effects on electrical resistance and strain sensitivity of smart concrete. *Construction and Building Materials*. 2019; 224:420-427. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.091

17. Denisyuk I.Yu., Uspenskaya M.V., Fokina M.I., Logushkova K.Yu. Conductive concrete composition. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics.* 2018; 18(1):158-162. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-158-162 (rus.).

18. Sobolkina A., Mechtcherine V., Khavrus V., Maier D., Mende M., Ritschel M. et al. Dispersion

of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix. *Cement and Concrete Composites.* 2012; 34(10):1104-1113. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.07.008

19. Menkovsky M.A., Yavorsky V.T. *Technology of sulfur.* Moscow, Khimiya, 1985; 327. (rus.).

20. Haliullin A.K. *Sulfur chemistry*. Moscow, Stroyizdat, 1995; 170. (rus.).

21. Paturoev V.V. *Polymer concrete*. Moscow, Stroyizdat, 1987; 285. (rus.).

22. Korolev E.V., Kiselev D.G., Proshina N.A., Albakaspov A.I. Teplofizichesky properties sulfuric the builder th of materials. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 8:249-253. (rus.).

23. Fediuk R., Amran Y.H.M., Mosaberpanah M.A., Danish A., El-Zeadani M., Klyuev S.V. et al. A critical review on the properties and applications of sulfur-based concrete. *Materials*. 2020; 13(21):4712. DOI: 10.3390/ma13214712

24. Lewandowski M., Kotynia R. Assessment of sulfur concrete properties for use in civil engineering. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 219:03006. DOI: 10.1051/matecconf/201821903006

25. Bernatskii A.F. Electrical insulating concrete. Properties, technology, application. *Concrete and reinforced concrete in the third millennium: proceedings of the international scientific and practical conference*. 2000; 81-89.

26. Gumeniuk A., Hela R., Polyanskikh I., Gordina A., Yakovlev G. Durability of concrete with man-made thermoplastic sulfur additive. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020; 869:032012. DOI: 10.1088/1757-899X/869/3/032012

Received April 29, 2021.
Adopted in revised form on June 7, 2021.
Approved for publication on June 7, 2021.

BIONOTES: **Alexander N. Gumeniuk** — Assistant of the Department of Building Materials, Mechanization and Geotechnics, V.A. Shumilov Institute of Construction and Architecture; **Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU)**; 7 Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Udmurt Republic, Russian Federation; SPIN-code: 6196-8655; ResearcherID: AAH-1846-2021; Scopus: 57204363802; ORCID: 0000-0002-2880-8103; aleksandrgumenyuk2017@yandex.ru;

Irina S. Polyanskikh — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Materials, Mechanization and Geotechnics, V.A. Shumilov Institute of Construction and Architecture; **Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU)**; 7 Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Udmurt Republic, Russian Federation; ID RISC: 604708, Scopus: 56789978800, ResearcherID: M-7100-2015, ORCID: 0000-0003-1331-9312; irina_maeva@mail.ru;

Semen M. Petrunin — undergraduate student of the Department of Building Materials, Mechanization and Geotechnics, V.A. Shumilov Institute of Construction and Architecture; **Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU)**; 7 Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Udmurt Republic, Russian Federation; gism56@mail.ru;

Filipp E. Shevchenko — postgraduate of the Department of Building Materials, Mechanization and Geotechnics, V.A. Shumilov Institute of Construction and Architecture; **Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU)**; 7 Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Udmurt Republic, Russian Federation; ID RISC: 1093846; gism56@mail.ru;

Grigory N. Pervushin — Doctor of Technical Science, Professor of the Department of Building Materials, Mechanization and Geotechnics, Director of the V.A. Shumilov Institute of Construction and Architecture; **Kalashnikov Izhevsk State Technical University (ISTU)**; 7 Studencheskaya st., Izhevsk, 426069, Udmurt Republic, Russian Federation; ID RISC: 406144, Scopus: 8731311800, ORCID: 0000-0002-7070-2855; gism56@mail.ru.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 16. Выпуск 6, 2021**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 16. Issue 6, 2021**

УДК 628.16:62-278 DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.698-719

Экономические аспекты очистки фильтратов полигонов хранения твердых коммунальных отходов с применением мембран

А.Г. Первов, Т.Н. Ширкова, Д.В. Спицов
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Сточные воды полигонов хранения твердых бытовых отходов (фильтраты ТБО) содержат в высоких концентрациях органические продукты разложения отходов, минеральные соли. Концентрации органических веществ (ОВ) в показателях химического потребления кислорода (ХПК) могут достигать 5000 мг/л, ионов аммония — 2500 мг/л, величина общего солесодержания — 15 000 мг/л. Для того чтобы очистить такие растворы методом обратного осмоса до значений, соответствующих современным нормативным требованиям сброса в окружающую среду, требуется очистка в две или в три ступени. Вследствие высоких значений солесодержания и ХПК, производительность современных обратноосмотических мембран, предназначенных для обессоливания подземных и морских вод, имеет очень низкое значение. С целью снижения затрат на мембранные аппараты авторами исследована возможность применения нанофильтрационных мембран на первой ступени очистки.

Материалы и методы. Проведены эксперименты, позволяющие определить изменение концентраций растворенных загрязнений в фильтратах обратноосмотических и нанофильтрационных мембран и снижение производительности мембран на каждой ступени очистки. Изучены варианты максимального снижения расхода концентрата при очистке фильтратов ТБО. Получены основные зависимости, позволяющие определить требуемые расходы концентрата в зависимости от глубины очистки по иону аммония. Описана методика выявления площади поверхности мембран на каждой ступени очистки в зависимости от состава фильтрата ТБО.

Результаты. Для трех разных составов фильтратов ТБО Московской области представлены расчеты эксплуатационных затрат в зависимости от выбранной схемы очистки и технологии дальнейшей утилизации концентратов мембранной установки.

Выводы. При обработке фильтратов твердых коммунальных отходов с высокими величинами ХПК и общего солесодержания целесообразно на первой ступени мембранной очистки использовать нанофильтрационные мембраны, что дает возможность сократить расход концентрата и уменьшить величину эксплуатационных затрат. Для утилизации концентрата установки обратного осмоса разработана технология, позволяющая разделить концентрат на два потока: поток с высоким содержанием ОВ и поток с высоким содержанием минеральных солей, хлоридов натрия и аммония.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обратный осмос, нанофильтрация, фильтрат полигонов хранения твердых бытовых отходов, увеличение выхода фильтрата, снижение производительности мембран, селективность мембран, затраты на замену мембран

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Первов А.Г., Ширкова Т.Н., Спицов Д.В.* Экономические аспекты очистки фильтратов полигонов хранения твердых коммунальных отходов с применением мембран // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 6. С. 698–719. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.698-719

Economic aspects of landfill leachate treatment using reverse osmosis membranes

Alexey G. Pervov, Tatiana N. Shirkova, Dmitriy V. Spitsov
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Landfill leachates contain highly concentrated organic products of waste degradation and mineral salts. Concentrations of organic matter demonstrate high COD values up to 5,000 mg/l, concentrations of ammonium ions reach 2,500 mg/l, while the total salt content may reach 15,000 mg/l. Two to three reverse osmosis treatment stages may be needed to produce the water that meets effective regulations governing the composition of water discharged into the environment. Also, high salt content and COD values dramatically reduce the membrane capacity. The co-authors explored the use of nanofiltration membranes at the first stage of the leachate treatment in an effort to reduce membrane operation costs.

Materials and methods. The experiments, conducted within the framework of this research undertaking, allowed to identify a change in the concentrations of contaminants, dissolved in the leachates of reverse osmosis and nanofiltration membranes, as well as the reduced capacity of membranes at each stage of treatment. The co-authors have studied the alter-

© А.Г. Первов, Т.Н. Ширкова, Д.В. Спицов
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

native methods that may ensure maximal reduction of the concentrate consumption in the process of leachate treatment. Principal dependencies, derived as a result of the research, enabled the co-authors to identify the concentrate consumption rates depending on the extent of treatment focused on ammonium ions. The co-authors describe the methodology employed to identify the area of membranes at each treatment stage depending on the leachate composition.

Results. Calculations of operating costs are provided for three compositions of leachates, typical for the Moscow region, depending on the treatment methodology and further recovery of membrane concentrates.

Conclusions. Nanofiltration membranes can be used at the first stage of the landfill leachate treatment in the case of high COD and salt content. The application of nanofiltration membranes allows to reduce the concentrate consumption rate and cut operating costs. A new technology is developed to split the concentrate into two flows: the flow that has a high organic matter content, and the flow that has a high content of mineral salts, sodium and ammonium chlorides in order to facilitate the recovery of the concentrate.

KEYWORDS: reverse osmosis, nanofiltration, landfill leachate, leachate recovery improvement, membrane capacity reduction, membrane selective ability, membrane replacement costs

FOR CITATION: Pervov A.G., Shirkova T.N., Spitsov D.V. Economic aspects of landfill leachate treatment using reverse osmosis membranes. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(6):698-719. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.698-719 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Создание полигонов хранения твердых коммунальных отходов (ТКО) породило проблему загрязнения подземных и поверхностных вод токсичными продуктами разложения органических веществ (ОВ). «Тело» полигона хранения ТКО (рис. 1) пропитано водой, содержащей токсичные органические и неорганические загрязнения в высоких концентрациях.

При выпадении осадков дождевые воды вытесняют воду из «тела» полигона, образуя фильтрат. Попадание фильтрата полигона ТКО в подземные и поверхностные водоисточники вызывает их загрязнение и создает серьезную экологическую проблему [1–3].

Возможность очистки фильтрата ТКО до уровня современных требований, предъявляемых к очищенной воде, поступающей в водоемы рыбохозяйственного назначения, представляет сложную техническую задачу [4, 5]. Так, содержание ионов аммония следует снизить (в случае полигона «Тимохово» (табл. 1)) в 5–6 тысяч раз. Удаление из воды органических загрязнений при таких высоких показателях химического потребления кислорода (ХПК) (от 2000 до 4000 и выше) также требует серьезных затрат [6–8]. Рядом исследователей проводилось изучение возможности химического осаждения органических загрязнений, определяемых показателем ХПК, из фильтрата ТКО [9, 10]. Как показали результаты этих работ, для добавления реагентов —

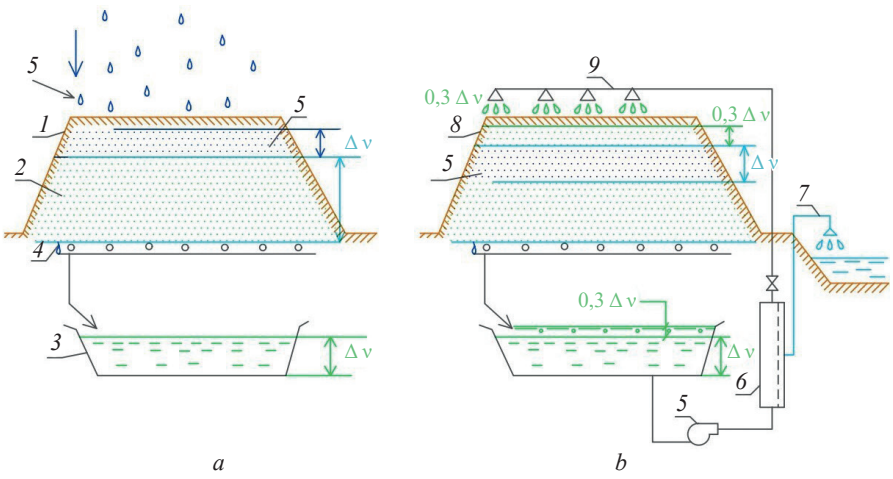


Рис. 1. Загрязнение подземных и поверхностных вод токсичными продуктами разложения ОВ полигонов твердых бытовых отходов (ТБО): *a* — образование фильтрата ТБО во время дождя; *b* — очистка фильтрата ТБО методом обратного осмоса и возврат концентрата в «тело» полигона; *1* — объем, заполненный дождевой водой; *2* — «тело» полигона; *3* — водоем сбора фильтрата полигона; *4* — объем, заполненный концентратом установки обратного осмоса; *5* — рабочий насос установки обратного осмоса; *6* — мембранный аппарат обратного осмоса; *7* — выход очищенной воды; 8 — покрытие полигона; 9 — сброс концентрата на «тело» полигона

Fig. 1. Contamination of subterranean and surface waters by toxic products of organic matter decomposition at landfills: *a* — the landfill leachate generated during rainfalls; *b* — landfill leachate treatment using reverse osmosis techniques and the return of the concentrate into the landfill body; *1* — the area filled with rainwater; *2* — the landfill body; *3* — the landfill leachate collection tank; *4* — the area filled with the reverse osmosis concentrate; *5* — the reverse osmosis pump; *6* — the reverse osmosis membrane; *7* — treated water; 8 — landfill coating; 9 — concentrate discharge on the landfill body

сернокислого железа [11–13], извести [11, 14–16], флокулянтов [7, 8, 15, 17] и других реагентов в стехиометрических количествах (не менее 5–7 г на 1 л фильтрата ТКО) необходимы значительные затраты [18, 19]. Большое количество образующегося осадка вызывает решение проблем по его утилизации и вывозу на специальные полигоны. Поэтому в практике очистки фильтратов ТКО методом обратного осмоса [15, 17] часто стадия предварительной очистки используется только для удаления взвешенных веществ. А удаление растворенных солей и органических соединений производится с помощью метода обратного осмоса [15, 17, 20] с получением очищенной воды и концентрата.

Как известно, технология обратного осмоса позволяет эффективно удалять из воды не только загрязнения в ионной форме (аммоний), но и растворенные органические соединения, определяемые показателем ХПК [4, 5, 11–13, 15]. Современные обратноосмотические мембраны при очистке снижают концентрацию аммония в воде в 20–30 раз [20–22]. Чтобы снизить содержание аммония в 2000–5000 раз, нужно не менее трех ступеней обработки воды, когда очищенная мембранами вода проходит обработку на следующей ступени обратного осмоса (рис. 2) [20–22]. При этом с ростом величины ХПК и общего солесодержания производительность мембран снижается [17, 22]. Часто при обработке воды с высоким содер-

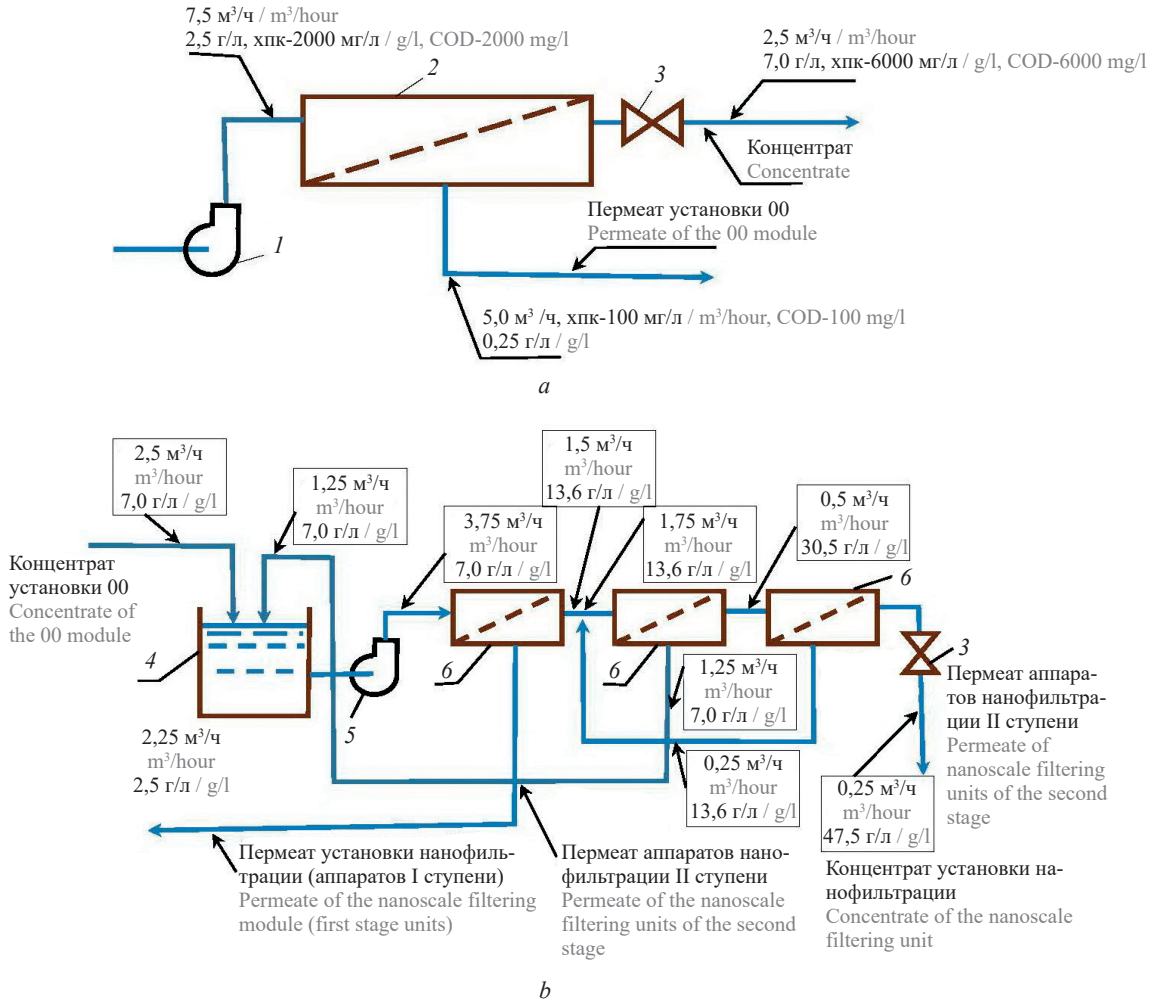


Рис. 2. Балансовые схемы обработки фильтратов ТКО с применением установок обратного осмоса и нанофильтрации: *a* — балансовая схема разделения фильтрата ТКО методом обратного осмоса на пермеат и концентрат; *b* — принципы сокращения расхода концентрата установки обратного осмоса путем применения «каскада» нанофильтрационных мембранных аппаратов; *1* — рабочий насос; *2* — обратноосмотический аппарат; *3* — регулирующий давление вентиль; *4* — бак сбора концентрата; *5* — рабочий насос установки нанофильтрации для сокращения расхода концентрата; *6* — нанофильтрационные аппараты-концентраторы

Fig. 2. Balance diagrams of landfill leachate treatment using reverse osmosis and nanofiltration facilities: *a* — the balance diagram of the landfill leachate division into permeate and concentrate using reverse osmosis membranes; *b* — concentrate consumption reduction principles based on the "cascade" of nanofiltration membrane modules; *1* — main pump; *2* — reverse osmosis module; *3* — pressure regulation valve; *4* — concentrate collection tank; *5* —— pump of the nanofiltration unit reducing the concentrate consumption rate; *6* — nanoscale filtering concentrators

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

жанием солей и ОВ низконапорные мембраны могут оказаться неприменимы в силу низкой величины удельной производительности. Потому в ряде случаев для очистки фильтратов ТКО используют мембраны, предназначенные для опреснения морской воды, работающие при давлении 50–70 бар [22].

Серьезную проблему при применении технологии обратного осмоса представляют образование концентратов и их утилизация [23–27]. Расходы концентратов при обработке фильтратов ТКО методом обратного осмоса даже с помощью мембран, предназначенных для опреснения морской воды, составляют не менее 30 % от всей поступающей на обработку воды. Уменьшение расхода концентрата влечет за собой увеличение концентраций солей и органических веществ в концентрате, увеличение осмотического давления и, как результат — резкое падение производительности мембран. Именно это обстоятельство создает сложности для применения метода обратного осмоса для очистки фильтратов полигонов ТКО.

В практике эксплуатации систем обратного осмоса на полигонах ТБО получаемый концентрат установок обратного осмоса, составляющий порядка 30 % от общего количества обрабатываемого фильтрата, после обработки возвращается в «тело» полигона путем его равномерного «разбрызгивания» над поверхностью (рис. 1). Это приводит к тому, что к получаемому после дождя фильтрату ТКО прибавляется еще 30 % его расхода. Таким образом, на установку обратного осмоса поступает дополнительно расход, составляющий 30 % поступающей на очистку воды, а после обработки этих «дополнительных тридцати процентов» методом обратного осмоса к этой части прибавляется еще 10 % общего расхода (1/3 расхода концентрата). Для получения 1 м^3 очищенного фильтрата ТКО установка обратного осмоса должна быть рассчитана на получение 1,4 м^3 очищенного фильтрата, что практически в полтора раза увеличивает ее капитальные и эксплуатационные затраты.

Поступление с концентратом всех удаленных из фильтрата ТКО загрязнений и смешение его с дождевой водой сохраняет баланс загрязнений: после смешивания дождевой воды и концентрата получается вода, соответствующая по составу фильтрату ТКО. Накопление загрязнений в теле полигона ведет со временем к увеличению их концентраций и усложнению очистки фильтратов ТКО. С целью повышения очистки фильтратов ТКО следует искать решения по утилизации концентратов установок обратного осмоса. Одним из наиболее эффективных путей решения этой проблемы может быть: радикальное снижение расхода концентрата до величины 1–5 % от расхода исходной воды и возможный вывоз и утилизация концентрата вместе с обезвоженным осадком, который уже осуществляется на ряде объектов при очистке стоков ливневых вод промплощадок и предприятий химической промышленности [20, 21, 28]. При обработке воды с высоким солесодержанием увеличение величины выхода фильтрата (отношения расхода фильтрата к расходу исходной воды, поступающей на очистку) ведет к падению производительности мембран. Увеличить величину выхода фильтрата можно, применяя низкоселективные нанофильтрационные мембраны [17, 20, 24]. Такой «каскадный» подход применяется при опреснении морской воды [8, 24–27], а также при концентрировании солевых растворов [27]. При этом значение величины выхода фильтрата при обработке стоков ТКО может достигать 90–95 %, а концентрация солей в концентрате достигать 75–80 г/л [28–30].

В настоящей работе рассмотрены три варианта решения проблемы. В первом случае изучен традиционный подход, применяемый сейчас при очистке фильтратов ТКО на большинстве полигонов Московской области. Перед подачей на установки обратного осмоса фильтрат ТКО проходит предварительную обработку с применением коагулянтов и флокулянтов в режиме контактного осветления с целью удаления взвешенных веществ. Такая схема получила название «кайзеровской» по имени генерального директора компании «Экокон» Оливера Кайзера (Австрия), первой начавшей «освоение» полигонов ТКО в Московской области. «Кайзеровская» схема ведет обработку фильтрата ТКО в три ступени, на первой ступени используются мембраны для опреснения морской воды, работающие под давлением 60–70 МПа. Это связано с тем, что фильтрат ТКО имеет не только высокое солесодержание (от 2000 до 9000 мг/л), но и высокое значение ХПК (1700–3000 мг/л). Это повышает требуемую величину рабочего давления. Потому «кайзеровская» схема может обеспечить расход концентрата не менее 30 % от расхода исходного фильтрата (рис. 2). Балансовая схема первой ступени такой схемы показана на рис. 2, *a*. Принципы дальнейшей обработки концентрата с применением низкоселективных нанофильтрационных мембран с целью снижения его расхода приведены на рис. 2, *b*.

Для снижения затрат на обработку фильтрата ТКО и одновременной утилизации концентрата авторами исследовалась также схема, использующая реагентно-мембранную технологию [28, 31–33]. В соответствии с разработанной технологией, исходный фильтрат подвергается реагентной обработке (добавке реагентов в стехиометрических количествах, позволяющих осадить большую часть содержащихся ОВ). Благодаря удалению ОВ и снижению величины ХПК, расход концентрата установки обратного осмоса может быть снижен до величины, не превышающей 2–3 % от расхода поступающей на очистку воды. Это достигается посредством удаления из воды растворенных ОВ, существенно увеличивающих осмотическое давление фильтрата ТКО,

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

что позволяет снизить величину рабочего давления. Принципы снижения расхода концентрата с применением низкоселективных (нанофильтрационных) мембран и балансовая схема потоков представлены на рис. 2, *b*. Концентрат после установки обратного осмоса (рис. 2, *a*) проходит последовательно через аппараты-концентраторы с нанофильтрационными мембранами, которые задерживают (в зависимости от величины рабочего давления) от 60 до 70 % содержащихся в исходной воде солей. Поэтому пермеат каждой ступени аппаратов-концентраторов (рис. 2, *b*) направляется на вход в аппараты предыдущей ступени, поскольку пермеат аппаратов этой ступени по своему солевому составу приближается к исходной воде, поступающей в аппараты предыдущей ступени. Так, пермеат аппаратов-концентраторов первой ступени идет на вход в установку обратного осмоса, поскольку его солесодержание близко по значению к солесодержанию исходной воды. Пермеат аппаратов-концентраторов второй ступени — на вход в аппараты-концентраторы первой ступени, поскольку по своему составу этот пермеат приближается к составу концентрата установки обратного осмоса. И так далее: пермеат аппаратов третьей ступени поступает на вход в аппараты второй ступени. Таким образом, достигается требуемое снижение расхода концентрата при низком давлении. Например, как видно из рис. 2, *b*, концентрация солей в концентрате установки достигает 47,5 мг/л при давлении 16–17 бар, поскольку разница осмотических давлений между концентратом и пермеатом составляет 15 бар [27, 28, 31, 32]. Концентрат может быть утилизирован совместно с обезвоженным осадком [28, 31].

Снижение расхода концентрата достигается благодаря использованию на первой ступени очистки нанофильтрационных мембран, обладающих более высокой производительностью [25, 26] при низких величинах рабочего давления [29, 30]. Осадок может быть утилизирован на полигоне ТКО при его рекультивации. Такой подход дает возможность сократить расходы электроэнергии, затраты на мембраны и реагенты для их эксплуатации и в целом оказывается более экономически эффективным, чем применение традиционного подхода с возвратом концентрата в тело полигона [33]. Однако складирование на полигоне осадка, содержащего практически все удаленные из воды загрязнения, сохраняет опасность заражения ими водоисточников. Представляется целесообразным «вывозить» удаленные загрязнения с полигона. Для этого авторами рассмотрен еще один технологический подход, состоящий в «радикальном» сокращении расхода концентрата при обработке фильтратов ТКО, доведя его расходы до минимальных значений (2–5 % в зависимости от солесодержания фильтрата ТКО), позволяющих осуществлять его вывоз автотранспортом. Концентрат может быть доставлен на станции очистки сточных вод и может смешиваться с осадком, поступающим на обезвоживание (рис. 3). Для предотвращения попадания в обезвоженный осадок дополнительных загрязнений от фильтрата ТКО, вызывающих изменение категории его опасности, авторами разрабатываются новые подходы по разделению концентрата на различные потоки, что позволяет проводить их раздельную утилизацию.

Для случаев обработки фильтратов ТКО авторами проработаны трехступенчатые и четырехступенчатые схемы [28, 31, 32], где для снижения расходов на закупку и замену мембран и увеличения выхода фильтрата на первой ступени использованы низкоселективные нанофильтрационные мембраны. Балансовые схемы и уравнения представлены на рис. 3.

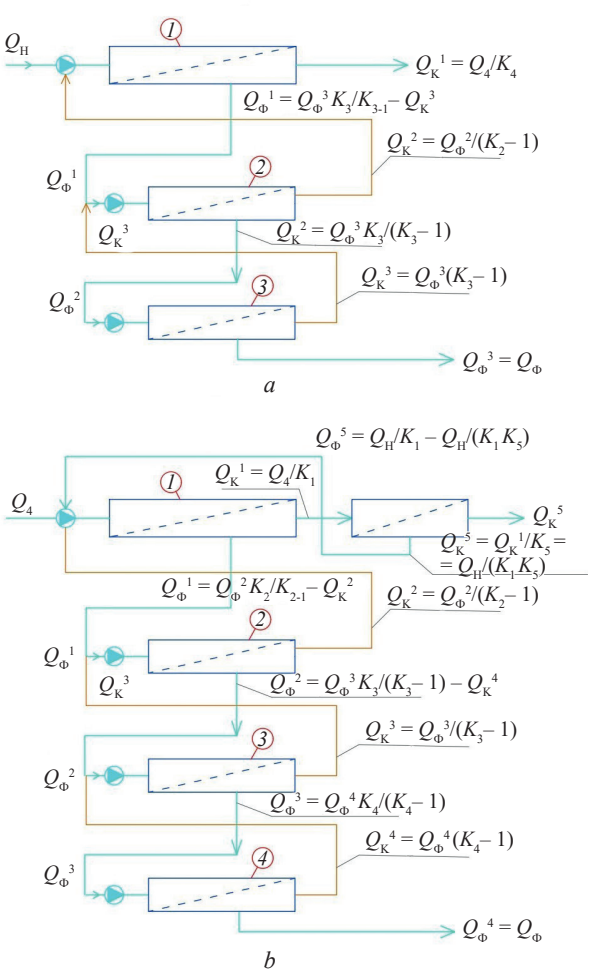


Рис. 3. Схемы очистки фильтрата ТБО с применением мембран обратного осмоса на первой ступени (*a*) и с применением нанофильтрационных мембран с сокращением расхода концентрата (*b*): *1* — аппарат первой ступени; *2* — аппарат второй ступени; *3* — аппарат третьей ступени; *4* — аппарат четвертой ступени

Fig. 3. Flow diagrams of landfill leachate treatment using reverse osmosis membranes at the first stage (*a*) using nanofiltration membranes that reduce concentrate consumption (*b*) *1* — first stage unit; *2* — second stage unit; *3* — third stage unit; *4* — fourth stage unit

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

На первой ступени используются нанофильтрационные мембраны с низкой селективностью по солям (70 %), что дает возможность достичь на первой ступени заданной величины выхода пермеата (отношения расхода пермеата к общему расходу воды, поступающей на обработку). При увеличении величины выхода пермеата на первой ступени солесодержание пермеата (воды, прошедшей через нанофильтрационные мембраны) увеличивается и приближается по составу к исходной воде. Поэтому часть фильтрата первой ступени, полученная при значении величины выхода фильтрата не более 75–80 %, поступает на очистку на второй ступени, а оставшаяся часть фильтрата первой ступени, получаемая в аппаратах, работающих при значении выхода пермеата 80–97 %, смешивается с исходной водой. Это увеличивает расход воды, поступающей на установку первой ступени и, соответственно, количество нанофильтрационных аппаратов, используемых на первой ступени (рис. 3, *a*, *b*). На второй ступени используются низконапорные мембраны обратного осмоса. Значение величины выхода пермеата на второй ступени определяет эффективность задержания иона аммония и содержание его в пермеате второй ступени, поступающего на дальнейшую очистку. На третьей и четвертой ступенях (рис. 3, *b*) величина выхода пермеата может иметь значение 90 %, поскольку обработке подвергается вода с низким значением солесодержания. Применение нанофильтрационных мембран на первой ступени дает существенное снижение капитальных и эксплуатационных затрат по сравнению со случаями использования высоконапорных мембран обратного осмоса, поскольку суммарная площадь мембранной поверхности в мембранных аппаратах в случае нанофильтрационных мембран оказывается меньше, чем в схемах с мембранами высокого давления [25–28].

Концентрат установки обратного осмоса имеет величину общего солесодержания 80 г/л. Для его утилизации авторами проработан вопрос удаления концентрата вместе с обезвоженным осадком в виде его влажности. С этой целью концентрат смешивается с осадком, поступающим на обезвоживание (рис. 4). После смешения концентрата с осадком и проведения процесса обезвоживания иловая вода и вода после смешения концентрата с осадком проходит обработку на установке обратного осмоса для разделения ее на очищенную воду (поступающую на вход в установку биологической очистки) и концентрат (с величиной общего солесодержания 80 г/л). Расход очищенной воды (пермеата) равняется количеству воды, поступающей в уплотнитель вместе с влажным осадком. Таким образом, в баке-уплотнителе осадка соблюдается солевой баланс: количество солей, поступающее с влажным осадком и с концентратом установки обратного осмоса, равняется количеству солей, выводимому из бака-уплотнителя вместе с водой, содержащейся в обезвоженном осадке. Все содержащиеся в концентрате установки обратного осмоса удаленные загрязнения выводятся вместе с осадком, влажность которого составляет 80 % [13].

Для расчетов многоступенчатых установок следует знать значения величин K на каждой ступени,

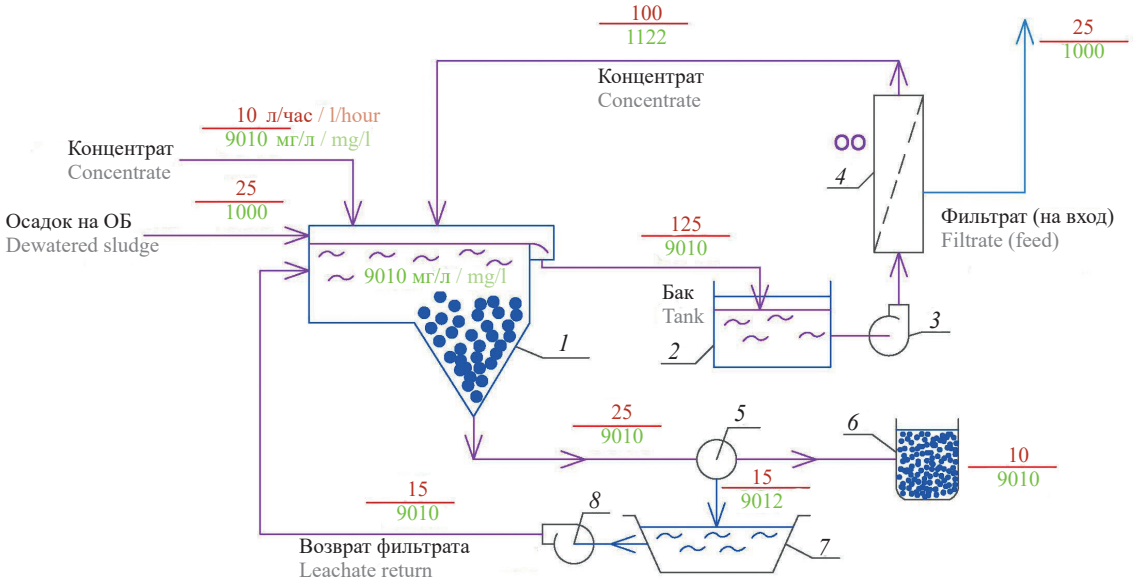


Рис. 4. Принципы утилизации концентрата: *1* — осадкоуплотнитель; *2* — бак отстойной воды; *3* — насос установки обработки иловой воды; *4* — мембраны обработки иловой воды после обезвоживания осадка; *5* — система обезвоживания; *6* — мешок; *7* — бак сброса иловой воды; *8* — насос возврата иловой воды

Fig. 4. Principles of concentrate recovery: *1* — sludge densifier; *2* — settling water tank; *3* — sludge water treatment pump; *4* — membranes used to treat sludge water after the sludge is dewatered; *5* — sludge dewatering system; *6* — sludge bag; *7* — sludge water tank; *8* — sludge water recycling pump

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6. 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6. 2021

количество ступеней, значения величин рабочего давления, типы мембран и требуемые количества мембранных аппаратов на каждой ступени. Расчет ведется, исходя из заданных значений расхода пермеата последней ступени и расхода концентрата на первой ступени. Величина выхода пермеата на последней ступени составляет 0,9. Концентрат последней ступени направляется на вход в предыдущую мембранную ступень. Расход пермеата предпоследней ступени (рис. 3) определяется, как сумма расходов пермеата и концентрата последней ступени. Аналогично рассчитываются расходы пермеатов на каждой ступени мембранной установки.

Цели исследования:

• определить для разных составов фильтратов полигонов ТКО типы мембран и параметры установки, обеспечивающей требуемое качество очищенной воды;

• обосновать для разных составов фильтратов полигонов ТКО выбор мембран и установить максимально достижимое значение величины выхода фильтрата установки (кратность снижения объема исходной воды) и затраты на достижение этой величины;

• обосновать принципы и экономическую целесообразность применения нанофильтрационных мембран в схемах очистки фильтратов полигонов ТБО, а также вывоза и утилизации концентрата на станциях обработки осадка.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Параметры для расчета установок определены в лабораторных условиях на экспериментальном стенде, показанном на рис. 5. Были исследованы составы трех проб фильтратов с полигонов ТБО «Царево» и «Тимохово» в Московской области и ТКО «Александров» во Владимирской области. Составы фильтратов ТБО, а также составы очищенных вод и концентратов, полученных в результате экспериментов, представлены в табл. 1. Эксперименты проводились в лабораторных условиях на экспериментальном стенде (рис. 4). Объем пробы фильтрата, использованного в каждом эксперименте, — 20 л. Исходная вода (фильтрат полигона ТКО) помещалась в бак исходной воды *1*, откуда вода насосом *2* подавалась в мембранный аппарат *3*, где разделялась на очищенную воду (фильтрат) и концентрат. Концентрат возвращался в бак *1*, а фильтрат собирался в баке фильтрата *4*. В качестве рабочего насоса использовался шестеренчатый насос модели RO-900-220 производства компании «Райфил» (Москва). Расход шестеренчатого насоса составлял 70–80 л/ч при давлении 7 бар (0,7 МПа). Концентрат после мембранного аппарата возвращался в бак *1*, а фильтрат собирался в бак *4*. В экспериментах использовались мембранные элементы стандарта 1812 производства компании CSM (Корея) с нанофильтрационными мембранами типа 70 NE (модель NE 1812-70), обратноосмотическими мембранами низкого давления типа BLN (модели RE 2012-100), а также с высокоселективными мембранами типа BE (модели RE 1812-60).

По мере накопления фильтрата в баке *4* объем исходной воды в баке *1* уменьшался и значения концентраций растворенных солей и ОВ, обобщенно описываемых показателем ХПК, увеличивались, а производительность мембранного

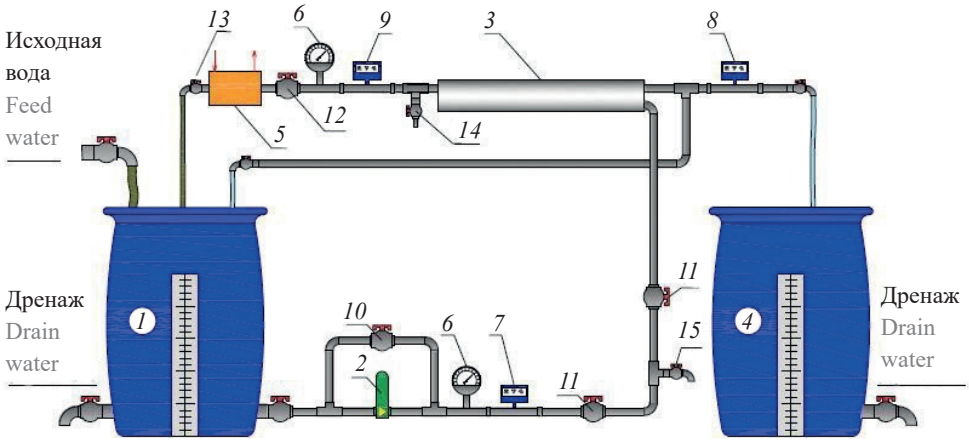


Рис. 5. Экспериментальная установка для определения параметров работы мембран при разделении фильтрата ТБО: *1* — бак исходной воды; *2* — насос; *3* — мембранный элемент в напорном корпусе; *4* — бак фильтрата; *5* — теплообменник; *6* — манометр; *7–9* — расходомеры; *10* — кран байпаса; *11* — вентиль регулировки расхода исходной воды; *12* — вентиль регулировки рабочего давления и расхода концентрата; *13* — кран регулировки расхода охлаждающей воды; *14*, *15* — пробоотборники

Fig. 5. An experimental unit used to determine operating parameters of membranes in the process of leachate splitting: *1* — feed water tank; *2* — pump; *3* — membrane element in the pressure vessel; *4* — leachate tank; *5* — heat exchanger; *6* — manometer; *8*, *9* — flow meters; *10* — bypass valve; *11* — feed water flow valve; *12* — concentrate pressure and flow regulation valve; *13* — cooling water flow regulation valve; *14*, *15* — samplers

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

аппарата по очищенной воде падала. Отношение объема исходной воды $V_и$ к объему воды в баке *1* в тот момент эксперимента, когда отбиралась проба V_k, названо авторами коэффициентом концентрирования $K = V_и/V_k$. Значения коэффициента концентрирования K связаны со значениями величины выхода пермеата установки обратного осмоса (отношения расхода фильтрата $Q_ф/Q_и$) соотношением: $Q_ф/Q_и = (K – 1)/K$. На первой стадии экспериментов объем исходной воды уменьшался с 20 до 0,5 л для фильтрата «Царево», с 20 до 1 л для фильтрата «Тимохово» и с 20 до 2 л для фильтрата «Александров». Для экспериментов на второй стадии (моделирующих вторую ступень очистки) использовались 16 л фильтрата, полученных на первой стадии экспериментов при уменьшении объема исходной воды в баке *1* в 5 раз, что соответствует величине выхода фильтрата на первой ступени 80 % ($Q_ф/Q_и = 0,8$). При более высоких значениях величины K качество фильтрата низкоселективных нанофильтрационных мембран приближается к качеству исходной воды. Составы фильтратов полигонов ТКО, использовавшихся в экспериментах, показаны в табл. 1. Пример результатов обработки фильтрата полигона ТКО «Александров» с применением реагентов и мембран приведен в табл. 2. На рис. 6 продемонстрированы результаты определений концентраций различных загрязнений в пермеатах мембран на каждой ступени обработки, представленные в виде зависимостей концентраций загрязнений в пермеате от значений коэффициента снижения объема K (отношения объема исходной воды в начале эксперимента к объему концентрата в конце эксперимента).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Табл. 1. Составы фильтрата полигона хранения ТБО Московской области

Table 1. Chemical composition of landfill leachates in the Moscow region

Показатели Indicators	ТБО «Тимохово» Timokhovo landfill		ТБО «Царево» Tsarevo landfill		ТКО «Александров» Aleksandrov landfill	
	Исходный Feed leachate	Фильтрат после II ступени 2nd stage leachate	Исходный Feed leachate	Фильтрат после IV ступени 4th stage leachate	Исходный Feed leachate	Фильтрат после III ступени 3rd stage leachate
Взвешенные вещества, мг/л Suspended matter, mg/l	180	—	220	—	329	—
ХПК, мг/л COD, mg/l	1728	12	3200	2,1	4387	2,4
БПК, мг/л BOD, mg/l	805	—	925	—	2690	—
Аммоний (NH_4^+) мг/л Ammonium (NH_4^+) mg/l	425	0,45	2400	0,5	380	0,2
NO_3^-, мг/л NO_3^-, mg/l	65,5	—	59	—	—	—
Щелочность, мг/л Alkalinity, mg/l	5600	15	13 546	—	760	—
Cl^-, мг/л Cl^-, mg/l	728	2	2700	3,0	980	10,0
SO_4^- , мг/л SO_4^- , mg/l	210	29	1200	—	86	1,2
Общая жесткость, мг-экв/л Total hardness, mg-eq/l	15,5	—	20,0	—	5,5	—
pH	8,9	—	8,9	—	7,7	—
$Na^+ + K^+$, мг/л $Na^+ + K^+$, mg/l	480	—	1000	—	—	—
Фенолы Phenols	—	—	0,2	—	—	—
Общее солесодержание, мг/л Total salt content, mg/l	3600	6	9000	2	3580	65
Расход, $м^3$/сут Flow rate, m^3/day	1000	980	1000	950	1000	900

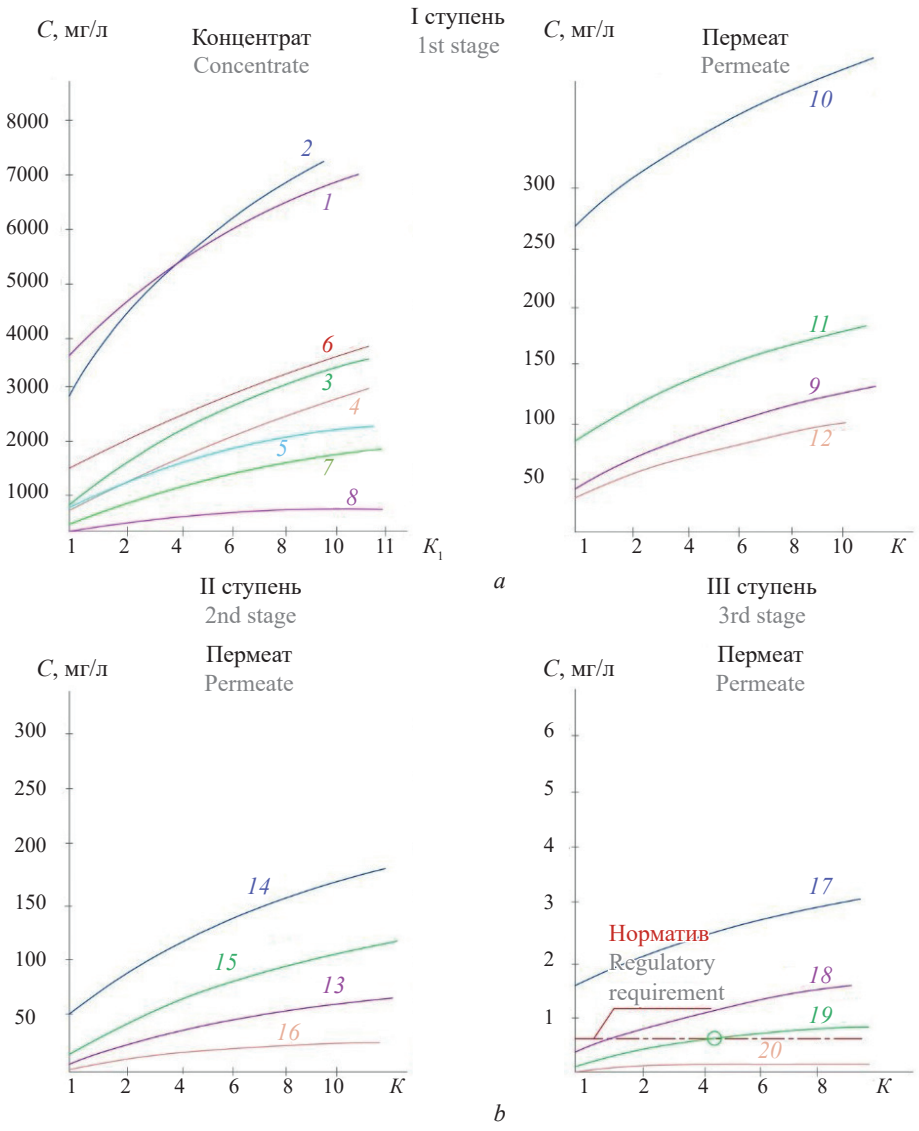


Рис. 6. Зависимости значений ХПК и концентраций аммония от величины *K* при использовании на всех ступенях мембран BLN: *a* — в концентрате установки первой ступени и в фильтрате установки первой ступени; *b* — в пермеате установки второй ступени и в фильтрате установки третьей ступени; *1* — ХПК; *2* — хлориды; *3* — аммоний; *4* — кальций; *5* — ХПК в пермеате первой ступени; *6* — хлориды в пермеате первой ступени; *7* — аммоний в пермеате первой ступени; *8* — кальций в пермеате первой ступени; 9 — ХПК; *10* — хлориды; *11* — аммоний; *12* — кальций; *13* — ХПК; *14* — хлориды; *15* — аммоний; *16* — кальций; *17* — ХПК; *18* —хлориды; *19* — аммоний; *20* — кальций

Fig. 6. Dependencies of Total Oxygen Demand (TOD) and ammonium concentrations on the value of *K* coefficient for the cases of the BLN membrane used at all stages: *a* — in the concentrate at the first reverse osmosis stage and in the leachate at the first stage; *b* — in the permeate at the second stage and in the leachate at the third stage; *1* — COD; *2* — chlorides; *3* — ammonium; *4* — calcium; *5* — COD in the first stage permeate; *6* — chlorides in the first stage permeate; *7* — ammonium in the first stage permeate; *8* — calcium in the first stage permeate; *9* — COD; *10* — chlorides; *11* — ammonium; *12* — calcium; *13* — COD; *14* — chlorides; *15* — ammonium; *16* — calcium; *17* — COD; *18* — chlorides; *19* — ammonium; *20* — calcium

На рис. 6 представлены полученные зависимости концентраций различных загрязнений при обработке фильтрата ТБО на первой ступени и пермеатов мембран, полученных на второй и третьей ступенях в зависимости от величины *K* (кратность снижения объема исходной воды после обработки, т.е. отношение объема исходной воды к объему концентрата). Полученные результаты обработаны таким образом, чтобы получить расчетные уравнения зависимостей селективности мембран от выхода фильтрата для разных типов мембран и составов исходной воды (рис. 7).

Алгоритм определения требуемых значений *K* и концентраций аммония на каждой ступени для четырехступенчатой схемы установки очистки фильтрата «Тимохово» (рис. 3) представлен на рис. 8. Сначала, зная нормативное значение концентрации аммония в воде, сбрасываемой в водоемы рыбохозяйственного назначения (0,5 мг/л), и задаваясь максимально возможной величиной выхода фильтрата

Табл. 2. Результаты обработки фильтрата ТКО «Александров» с применением трехступенчатой схемы обратного осмоса
Table 2. Results of leachate treatment using three-staged reverse osmosis at the Aleksandrov landfill

Показатели Indicators	Исходная вода Feed water	После реагентной обработки Post-reactant treatment	Реагентная обработка Reactant treatment		Без реагентной обработки No reactant treatment		
			После III ступени Following the 3rd stage	Концентрат Concentrate	После IV ступени Following the 4th stage	Концентрат 1 Concentrate 1	Концентрат 2 Concentrate 2
Расход, м³/час Flow rate, m³/hour	5,2–5,3	5,2	5	0,25	5	0,15	0,15
ХПК, мг/л COD, mg/l	4387	605	2,4	33 700	2,9	62 100	5500
pH	7,7	6,5	5,8	—	5,6	—	—
Кальций, мг/л Calcium, mg/l	190	70	1,0	—	0,8	1660	460
Натрий, мг/л Natrium, mg/l	1144	1100	4,5	—	4,8	1100	1900
Щелочность, мг/л Alkalinity, mg/l	76,0	13,6	1,2	—	1,4	—	—
Аммоний, мг/л Ammonium, mg/l	380	202	0,2	19 900	0,2	2100	17 800
Нитраты, мг/л Nitrates, mg/l	0,3	—	—	—	—	—	—
Нитриты, мг/л Nitrites, mg/l	1,20	—	—	—	—	—	—
Хлориды, мг/л Chlorides, mg/l	980	660	4,0	33 000	3,5	1700	42 000
Сульфаты, мг/л Sulphates, mg/l	627	508	1,2	3150	1,0	9100	1400
Железо, мг/л Ferrum, mg/l	36	5,6	0,1	—	0,05	—	—
Взвешенные вещества, мг/л Suspended matter, mg/l	329	20	—	—	—	—	—
БПК, мгO_2/л BOD, mg O_2/l	2690	391	—	—	—	—	—
Общее солесодержание, мг/л Total salt content, mg/l	3580	1900	8,3	46 000	7,7	12 900	67 000

на последней ступени очистки (например, значением 0,9, которое соответствует $K = 10$), определим значение селективности мембран по иону аммония и, соответственно, определим концентрацию иона аммония в воде, поступающей на четвертую ступень очистки (рис. 8, *d*). Это значение соответствует качеству фильтрата на третьей ступени очистки. Значение концентрации иона аммония в исходной воде, поступающей на четвертую ступень, можно определить, зная селективность мембраны по иону аммония R и значение концентрации иона аммония в фильтрате по формуле: $R = 100(C_и – C_ф)/C_и$, %, где R — селективность по иону аммония, %; $C_и$ — концентрация иона в исходной воде, поступающей в установку;

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6. 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6. 2021

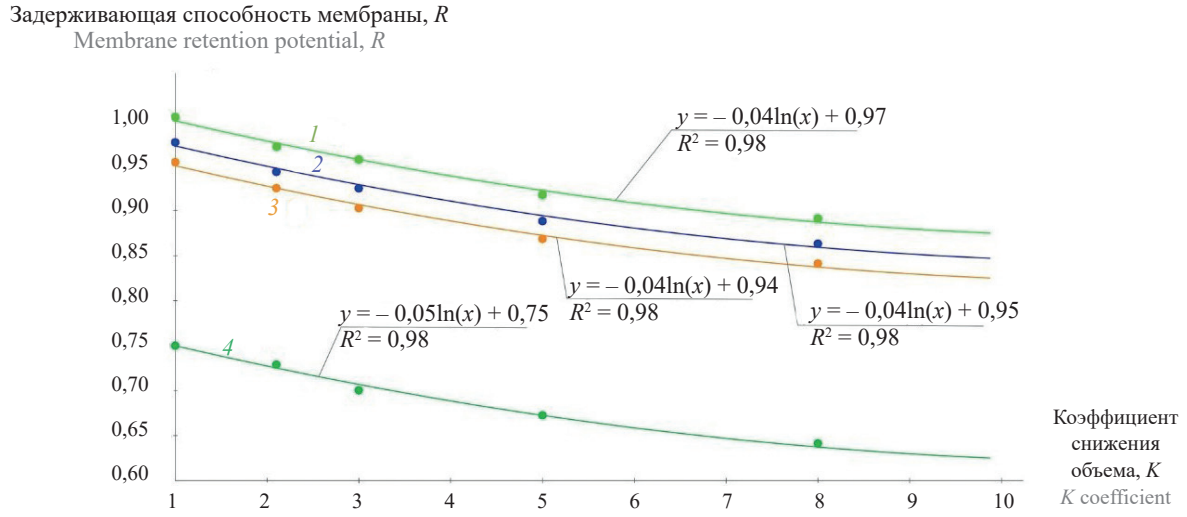


Рис. 7. Зависимости значений селективности мембран: *a* — в концентрате и в фильтрате установки первой ступени; *b* — в фильтрате установки второй, третьей и четвертой ступеней; *1* — мембрана BE (величина общего солесодержания исходной воды от 2000 до 2500 мг/л); *2* — мембрана BLN (величина общего солесодержания исходной воды: 2000–2500 мг/л); *3* — мембрана BLN (величина общего солесодержания 1000–5000 мг/л, значение ХПК 500–1000 мг/л); *4* — нанофильтрационная мембрана 70 NE (величина общего солесодержания 1000–10 000 мг/л, величина ХПК 1000–4500 мг/л)

Fig. 7. Dependencies of membrane selectivity values: *a* — in the concentrate and in the leachate of the 1st stage unit; *b* — in the leachates of the 2nd, 3rd and 4th stage units; *1* — BE membrane (the total salt content in the feed water is 2,000–2,500 mg/l); *2* — BLN membrane (the total salt content in the feed water is 2,000–2,500 mg/l); *3* — BLN membrane (the total salt content in the feed water is 1,000–5,000 mg/l, feed water: COD 500–1,000 mg/l); *4* — nanofiltration membrane 70 NE (the total salt content is 1,000–10,000 mg/l, COD — 1,000–4,500 mg/l)

$C_ф$ — концентрация иона в фильтрате установки. Аналогично, задаваясь максимальным значением $K = 10$ на третьей ступени очистки и зная значение концентрации аммония в фильтрате третьей ступени очистки, мы можем определить значение концентрации аммония в исходной воде третьей ступени очистки, соответствующее значению концентрации иона аммония в фильтрате второй ступени (рис. 8, *c*). На первой ступени (рис. 8, *a*) используются низкоселективные нанофильтрационные мембраны, главная цель которых — частичное снижение величин общего солесодержания и ХПК перед обработкой на второй ступени с применением мембран обратного осмоса. Задаваясь величиной *K* на первой ступени от 4 до 5 и зная концентрацию иона аммония в исходной воде, можно определить концентрацию иона аммония в фильтрате первой ступени, соответствующую концентрации иона аммония в воде, поступающей на вторую ступень. Зная значение концентрации иона аммония в фильтрате третьей ступени очистки, по формуле: $R = 100(C_и – C_ф)/C_и$ определим требуемое значение селективности мембран третьей ступени по аммонию и требуемое значение *K* (рис. 8, *b*).

Для определения требуемого количества мембранных элементов и площади поверхности мембран проанализированы полученные экспериментально зависимости производительности мембранного элемента от величины *K* (кратности снижения объема исходной воды в процессе эксперимента) для разных случаев обработки фильтратов ТКО различных составов с помощью мембран на разных ступенях очистки (рис. 9). Методика определения площадей поверхности мембран для схем очистки сточных вод с уменьшенным расходом концентрата описана в работе [22].

На рис. 10–12 представлены примеры определения требуемой площади поверхности нанофильтрационных мембран на первой ступени мембранной установки на примере очистки фильтрата ТБО «Тимохово» (табл. 1). Сначала выявлялись зависимости производительности мембран от величины *K* для разных составов исходных фильтратов ТКО на первой ступени очистки (рис. 10). Пользуясь полученными значениями удельной производительности мембран, для каждого диапазона изменения величины *K* были установлены объемы полученного в процессе эксперимента пермеата и площади поверхности мембран, необходимые для получения этих объемов пермеата на первой ступени очистки (рис. 11). Величина удельной производительности мембран определена исходя из площади мембран в рулонных элементах стандарта 1812, равной 0,5 м^2. Расчеты выполнены для установки производительностью 1000 л/ч (рис. 12).

На рис. 11, 12 показаны стадии определения площади мембран на примере обработки фильтрата ТКО «Александров».

На рис. 13 приведены результаты определения площадей мембран на каждой ступени очистки фильтратов ТБО «Царево», «Тимохово» и «Александров» в зависимости от выбранных схем их очистки и значений величин *K*. Результаты расчетов позволяют определить требуемые площади мем-

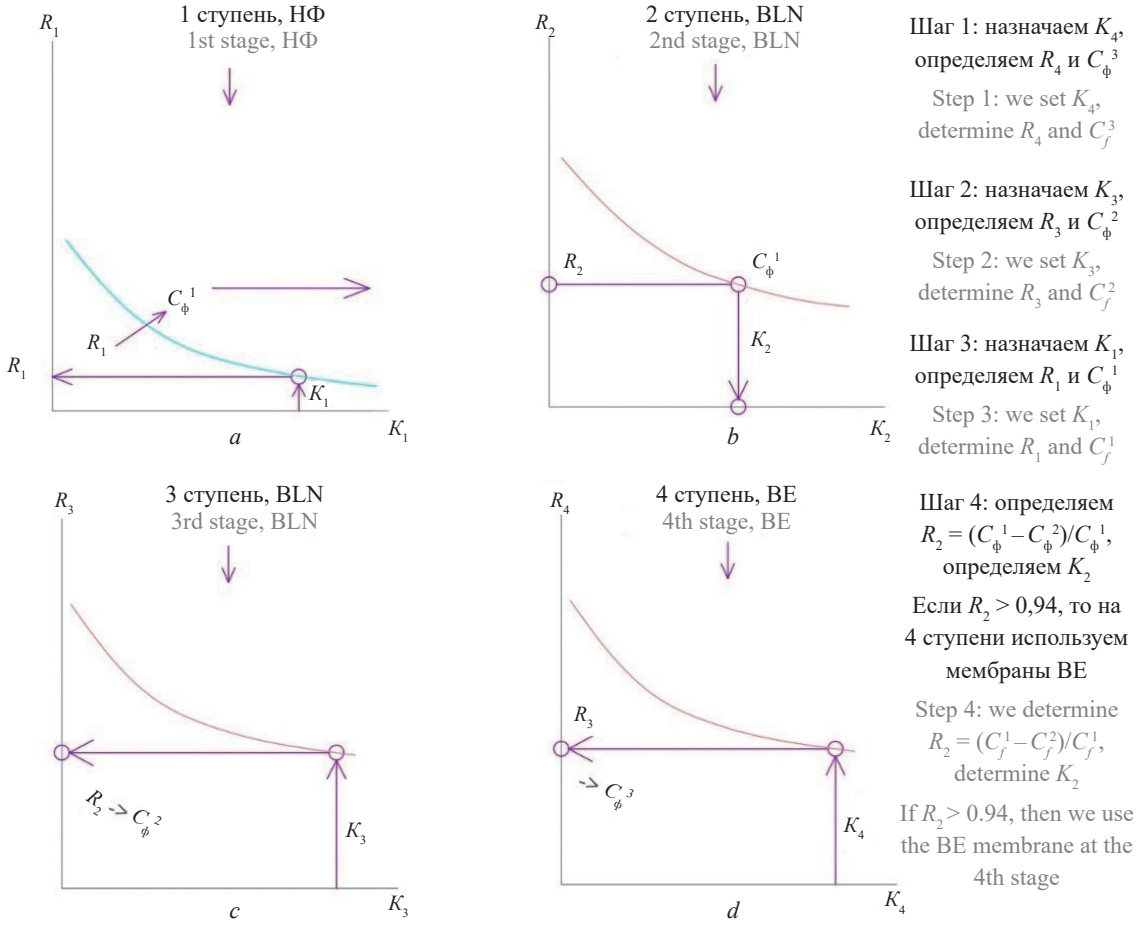


Рис. 8. Полученные логарифмические зависимости селективностей мембран по иону аммония и ХПК на каждой ступени очистки и алгоритм определения требуемых значений *K* и концентраций аммония на каждой ступени для четырехступенчатой схемы установки очистки фильтрата ТБО «Тимохово»: *a* — зависимость селективности мембраны 70 NE (1) по иону аммония от величины «выхода фильтрата» на первой ступени; *b* — зависимость селективности мембраны BLN (2) от «выхода фильтрата» на второй ступени; *c* — зависимость селективности мембран BLN (3) и мембраны среднего давления BE (4) от *K* на третьей ступени; *d* — зависимость селективности мембран BLN (3) и мембран среднего давления BE (4) на четвертой ступени от величины *K*

Fig. 8. The obtained logarithmic relationships between the membrane retention potential in terms of ammonium ion and COD at each stage and the algorithm for the determination of *K* and ammonium concentration values at each stage of the leachate treatment for the four-staged leachate treatment unit at Timokhovo landfill: *a* — dependence of the 70NE membrane ammonium retention potential on the *K* value at the first stage; *b* — dependence of BLN (2) membrane retention potential on the *K* value at the second stage; *c* — dependences of the retention potential of BLN (3) and BE (4) membranes on the *K* value at the third stage; *d* — dependences of the retention potential of BLN (3) membrane and BE (4) pressure membrane on the *K* value at the fourth stage

бран, количество мембранных элементов и затраты на приобретение мембран и их замену в зависимости от выбранной технологии очистки.

Зная площади мембранной поверхности, можно рассчитать требуемое количество мембранных элементов стандартных размеров и определить величину годовых затрат на замену мембран. Максимально достижимое значение величины *K* рассчитывается исходя из минимальных значений производительности мембран (рис. 8–10) на первой ступени очистки. Для нанофильтрационных мембран модели 70 NE такая величина общего солесодержания концентрата составляет порядка 80 г/л. Исходя из составов фильтратов ТБО (табл. 1), для фильтрата «Царево» общее количество концентрата составляет 5 % от общего количества обрабатываемой воды, а для фильтрата «Тимохово» — порядка 10 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Растворы концентратов можно утилизировать, смешивая их с осадками, поступающими на обезвоживание и дальнейшее сжигание или остеклование.

Для утилизации осадков городских сточных вод в промышленных масштабах работают системы остеклования и сжигания осадка. В ряде случаев осадок, содержащий аммоний в высоких концентрациях, может быть использован при производстве удобрений. На обработку поступают осадки с влажностью 80 %.

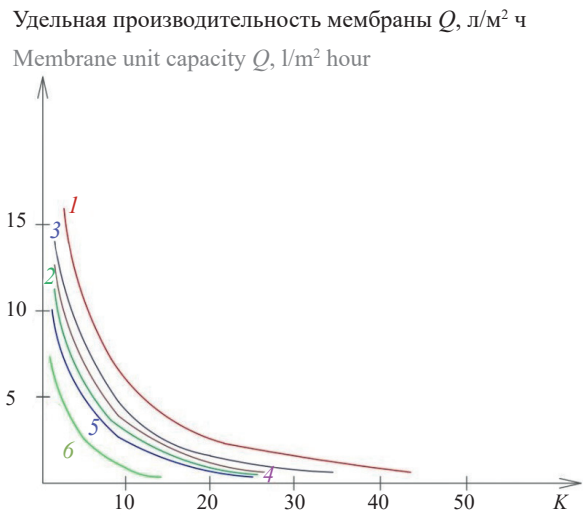


Рис. 9. Зависимости производительности мембранных элементов от K на первой ступени очистки фильтрата ТКО «Александров»: *1* — нанофильтрационная мембрана 70 NE; *2* — нанофильтрационная мембрана 90 NE; *3* — низконапорная обратноосмотическая мембрана BLN; *4* — мембрана среднего давления BE; *5* — мембрана для опреснения морской воды SW; *6* — высокоселективная мембрана RE

Fig. 9. Dependence of the capacity of membrane elements on K at the first stage of the leachate treatment at the Aleksandrov landfill: *1* — nanofiltration 70 NE membrane; *2* — nanofiltration 90 NE membrane; *3* — low pressure reverse osmosis membrane BLN; *4* — medium pressure membrane BE; *5* — high pressure seawater desalination membrane SW; *6* — high selectivity membrane RE

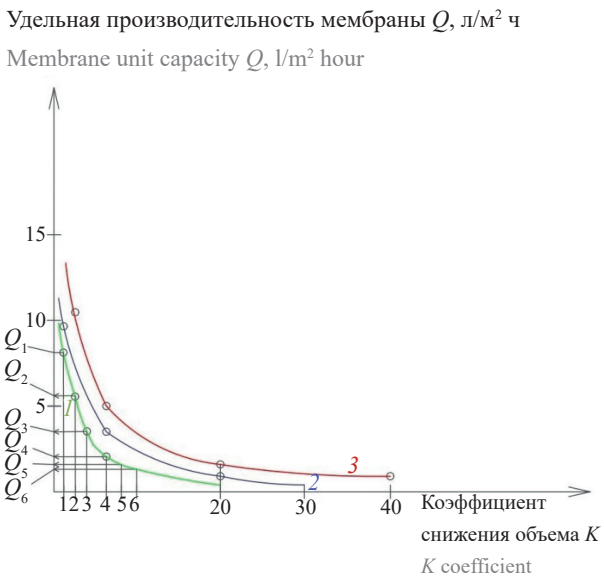


Рис. 10. Изменение величины удельной производительности мембран с ростом величины коэффициента снижения объема K: *1* — первая ступень, мембраны 70 NE; *2* — вторая ступень, мембрана BLN; *3* — третья ступень, мембрана BLN

Fig. 10. A change in the value of the membrane unit capacity accompanied by the K value increase: *1* — first stage, 70 NE membranes; *2* — second stage, BLN membrane; *3* — third stage, BLN membrane

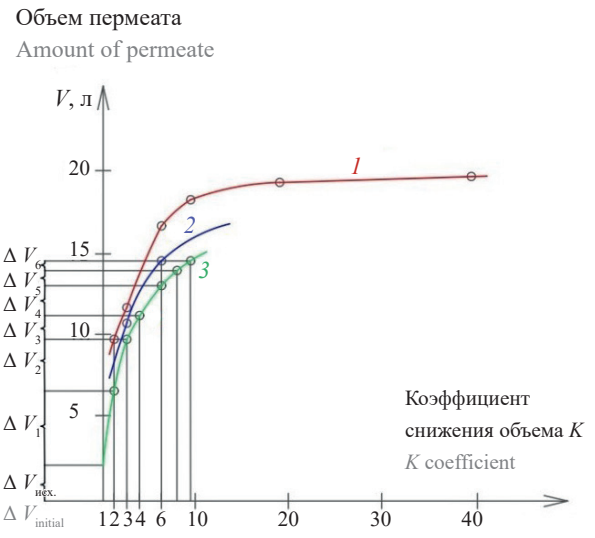


Рис. 11. Зависимости объема полученного пермеата от значения коэффициента снижения объема K в различных экспериментах: *1* — первая ступень, мембраны 70 NE; *2* — вторая ступень, мембраны BLN; *3* — третья ступень, мембраны BLN

Fig. 11. Dependences of the permeate amount on the K coefficient value, obtained in different experiments: *1* — first stage, 70 NE membranes; *2* — second stage, BLN membranes; *3* — third stage, BLN membranes

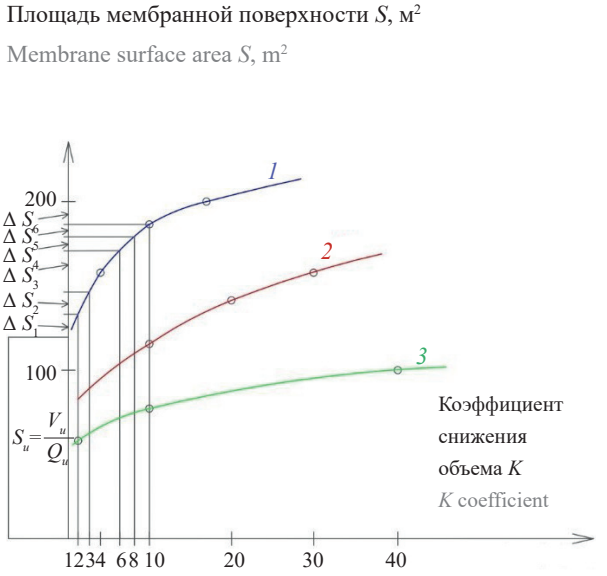


Рис. 12. Зависимости требуемой площади мембран от требуемого значения коэффициента снижения объема K в различных экспериментах: *1* — первая ступень, мембраны 70 NE; *2* — вторая ступень, мембраны BLN; *3* — третья ступень, мембраны BLN

Fig. 12. Dependences of the permeate amount on the K coefficient value, obtained in different experiments: *1* — first stage, 70 NE membranes; *2* — second stage, BLN membranes; *3* — third stage, BLN membranes

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

Это значит, что в 10 т обезвоженного осадка содержится 8 т воды и 2 т приходится на твердые вещества. На обезвоживание из отстойников поступает обычно осадок с влажностью 98 %, это значит, что на 2 т сухих веществ приходится 98 т воды. Разработанная утилизация концентрата установок ТБО состоит в следующем: концентрат в количестве 8 м^3 добавляется в 100 т поступающего на обезвоживание осадка. В процессе проведения обезвоживания профильтровавшаяся через ткань установки обезвоживания иловая вода и вода после отстаивания в илоуплотнителе обрабатываются на установке обратного осмоса с разделением на фильтрат и концентрат. Балансовая схема процесса показана на рис. 4. В процессе обработки из содержащейся во влажном осадке воды получают 8 м^3 концентрата, который выводится вместе с осадком, и 98 м^3 очищенной воды, которая направляется на вход в установку биологической очистки. Таким образом, в процессе обработки иловой воды на установке обратного осмоса расход поступающей на обработку воды снижается в 108/8 = 13,5 раз. Зная величины удельной производительности мембран при максимальной кратности концентрирования фильтрата ТБО (рис. 14), можно определить зависимость изменения величины удельной производительности мембран при обработке иловой воды при снижении ее объема в 12–15 раз (рис. 15) и установить требуемую площадь мембран и затраты на мембраны. На рис. 13 показан пример определения площадей поверхности мембран при обработке иловой воды после обезвоживания осадка: зависимости

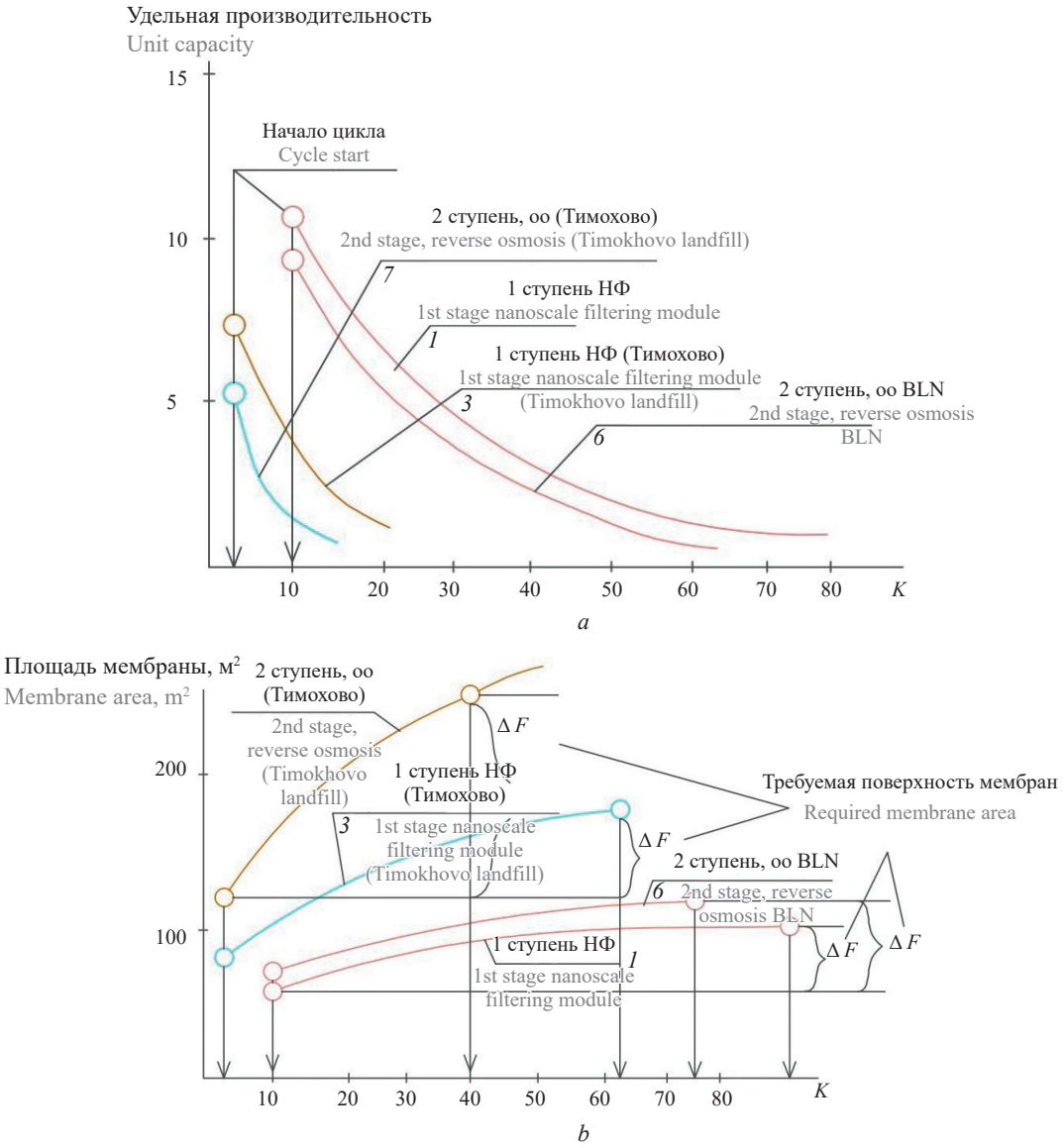


Рис. 13. Методика определения площади мембран, необходимой для обработки иловой воды при обезвоживании осадка: *a* — снижение производительности мембран в зависимости от *K*; *b* — зависимость требуемой площади поверхности мембран для достижения заданного значения *K*

Fig. 13. Methodology of identification of the membrane area required to treat sludge water in the course of sludge dewatering: *a* — membrane capacity reduction depending on the *K* value; *b* — dependence of the required membrane surface on the pre-set K value to be attained

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

величины удельной производительности мембран от K (рис. 13, *a*) и площади мембран от K (рис. 13, *b*) на примере обработки концентрата после очистки фильтрата ТКО «Александров» с расходом 5000 л/ч.

Обезвоженный осадок направляется на сжигание, остеклование. Возможно разделение осадка на органический раствор и раствор солей аммония. В этом случае не содержащий солей органический раствор может смешиваться с осадком сточных вод и направляться на полигоны. А концентрированный раствор солей аммония может использоваться в качестве сырья при производстве удобрений. Расчет затрат на дополнительную обработку в соответствии с рис. 3 показан на рис. 14. При добавлении концентратов установок очистки фильтратов ТКО к осадку обезвоженный осадок будет содержать дополнительные количества аммония и ОВ в больших концентрациях, что может изменить его категорию безопасности и усложнить его утилизацию. При возможности направить осадок на сжигание или остеклование, наличие высоких концентраций солей и ОВ в осадке не влияет на эффективность его утилизации. В случаях складирования осадков бытовых сточных вод на специальных полигонах, высокое содержание в осадке солей аммония может не допускаться. Авторами разработана технология разделения концентрата установок обработки фильтрата ТКО на два потока: поток, содержащий высокие концентрации ОВ, и поток с высоким содержанием солей (хлоридов аммония и натрия) [8–10]. Схема процесса показана на рис. 16. Концентрат нанофильтрационных мембран первой ступени (рис. 3, 15) с низким значением селективности по одновалентным ионам содержит в высоких концентрациях ОВ и многовалентные ионы (ионы кальция и магния, сульфат-ионы, ионы железа и тяжелых металлов). Одновалентные ионы (хлориды и бикарбонаты аммония и натрия проскакивают через мембраны первой ступени и задерживаются обратноосмотическими мембранами второй ступени, поэтому концентрат второй ступени содержит хлориды аммония и натрия (табл. 2)). Для того чтобы уменьшить концентрации одновалентных ионов в концентрате первой ступени, концентрат после проведения цикла концентрирования разбавлялся пермеатом второй ступени, и цикл концентрирования повторялся, при этом во время цикла одновалентные ионы проходили через мембрану. Этот прием позволил эффективно отделить двухвалентные ионы и ОВ от одновалентных ионов. Концентрированный раствор хлорида аммония может быть использован в качестве сырья при производстве удобрений, а концентрированный раствор ОВ может смешиваться с осадком, поступающим на обезвоживание (рис. 4). После обезвоживания иловая вода, содержащая ОВ, обычно поступает на вход в установку очистки сточных вод, поэтому поступление

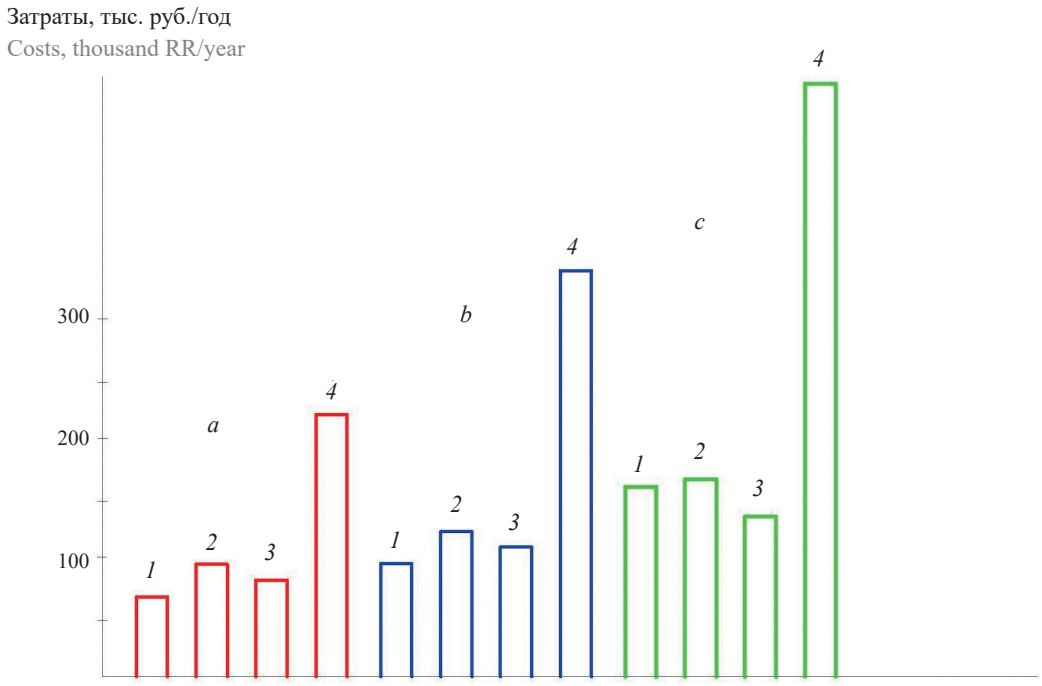


Рис. 14. Расчет затрат на дополнительную обработку концентрата очистки фильтрата ТКО «Александров» с расходом 5000 л/ч путем его утилизации вместе с обезвоженным осадком сточных вод: *a* — коэффициент снижения объема $K = 10$; *b* — коэффициент снижения объема $K = 20$; *c* — коэффициент снижения объема $K = 30$; *1* — затраты на электроэнергию; *2* — затраты на замену мембран; *3* — затраты на реагенты; *4* — общие годовые эксплуатационные затраты

Fig. 14. Calculated operating costs of the supplementary treatment of the concentrate at the Aleksandrov landfill, the flow rate is 5,000 liters per hour: *a* — volume reduction factor $K = 10$; *b* — volume reduction factor $K = 20$; *c* — volume reduction factor $K = 30$; *1* — energy costs; *2* — membrane replacement costs; *3* — reactant costs; *4* — total annual operating costs

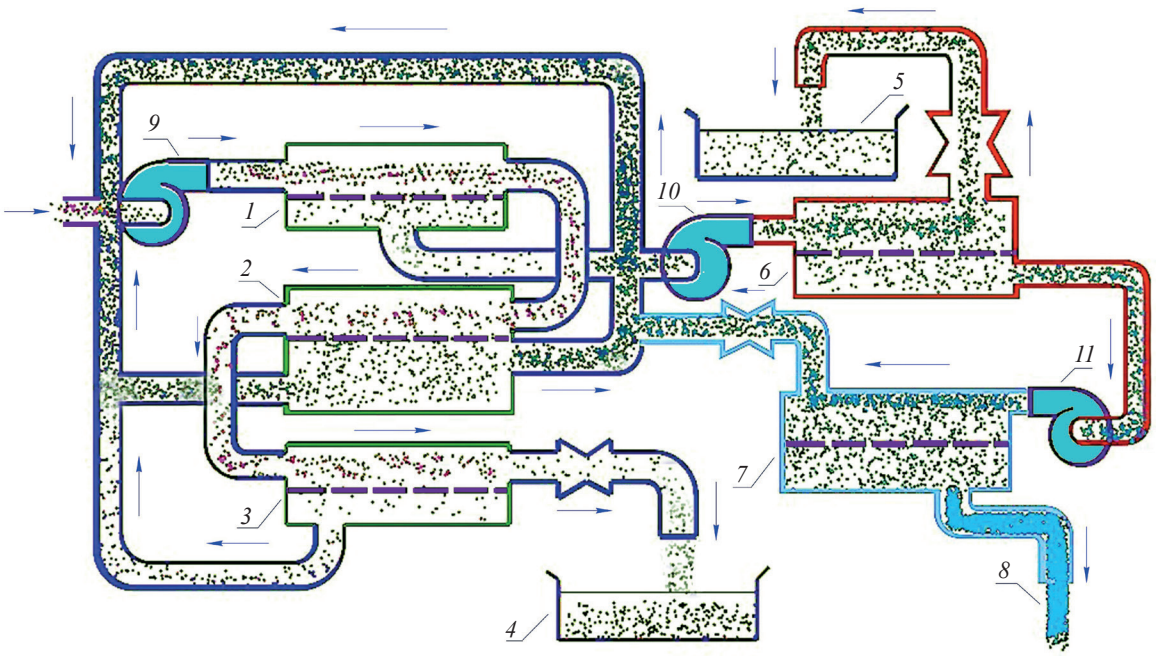


Рис. 15. Принципы получения различных потоков концентратов первой и второй ступеней: *1* — аппарат первой ступени очистки; *2* — аппарат второй ступени концентрирования; *3* — аппарат третьей ступени концентрирования; *4* — бак сбора концентрированного раствора ОВ; *5* — бак сбора концентрированного раствора солей аммония; *6* — аппарат второй ступени для концентрирования пермеата первой ступени; *7* — аппарат третьей ступени для концентрирования пермеата аппарата *6*; *8* — выход очищенной воды; *9* — насос первой ступени; *10* — насос второй ступени; *11* — насос третьей ступени

Fig. 15. Principles of splitting the concentrate into different flows at the 1st and 2nd stages: *1* — first stage treatment unit; *2* — second stage concentration unit; *3* — third stage concentration unit; *4* — tank for the solution of the concentrated organic matter; *5* — tank for the concentrated solution of ammonium salt; *6* — 2nd stage unit used to concentrate the 1st stage permeate; *7* — 3rd stage unit used to concentrate the permeate supplied by unit *6*; *8* — treated water tank; *9* — 1st stage pump; *10* — 2nd stage pump; *11* — 3rd stage pump

дополнительного количества ОВ не увеличит ХПК сточной воды более чем на 1–2 %.

По результатам экспериментального определения показателей работы мембран при обработке фильтрата ТКО «Тимохово» разработана технология обработки фильтрата с использованием четырех ступеней мембранной обработки и сокращением расхода концентрата в 20 раз. Это достигается за счет удаления из фильтрата ТКО ОВ на первой ступени с применением нанофильтрационных мембран, что позволяет облегчить обработку на второй ступени с применением низконапорных обратноосмотических мембран типа BLN. Поскольку солесодержание фильтрата ТКО «Тимохово» имеет высокое значение (3600 мг/л), на второй ступени трудно добиться высокого значения коэффициента снижения объема K, поэтому на второй ступени значение K выбрано 3. При увеличении значения K падает производительность мембран (рис. 9). Сокращение расходов концентратов первой и второй ступеней выполнено с применением «каскадов» нанофильтрационных мембран (рис. 2, *b*), а балансовая схема очистки фильтрата ТКО показана на рис. 16.

В результате обработки фильтрата ТКО «Тимохово», имеющего значение ХПК — 1700 мг/л, величину общего солесодержания — 3600 мг/л, иона аммония — 425 мг/л, получается очищенная вода (пермеат четвертой ступени) с концентрацией аммония 0,5 мг/л и величиной общего солесодержания 4,5 мг/л. Общее количество получаемого концентрата составляет 0,25 м^3/ч и составляет 5 % от расхода исходного фильтрата ТКО, поступающего на очистку. Концентрат разделен на два потока: концентрат первой ступени с расходом 0,1 м^3/ч, имеющий значение ХПК — 85 000 мг/л и величину общего солесодержания 39 000 мг/л. Концентрат второй ступени имеет значение ХПК 6500 мг/л и величину солесодержания 90 000 мг/л. Составы пермеатов первой, второй, третьей и четвертой ступеней представлены на рис. 16.

В табл. 3 и на рис. 17 приведены результаты определения эксплуатационных затрат на обработку фильтратов различных полигонов ТКО с учетом выбранных технологий очистки и затрат на утилизацию концентрата (рис. 14) в зависимости от величины K. Для выявления и сравнительной оценки эксплуатационных расходов для каждой технологии сделаны расчеты:

- затрат на электроэнергию, исходя из значений расходов исходной воды, пермеатов и концентратов, а также требуемых величин рабочих давлений;
- годовых затрат на замену мембранных элементов (замена мембранных элементов производится один раз в пять лет);

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6. 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6. 2021

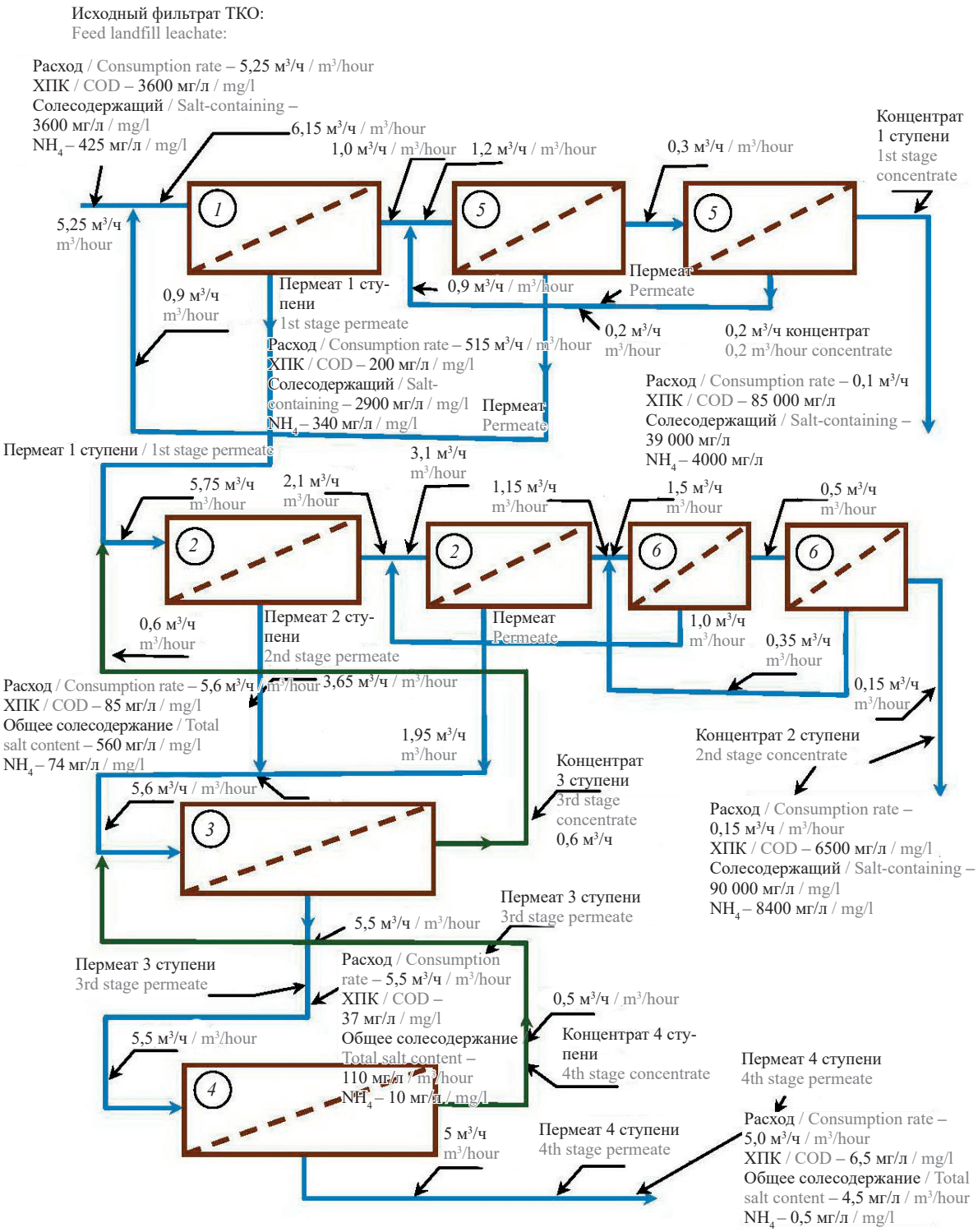


Рис. 16. Балансовая схема обработки фильтрата полигона ТКО с применением системы обратного осмоса с получением очищенной воды производительностью 5000 л/ч и сокращением расхода концентрата до значения 0,25 м³/ч: *1* — рабочий насос первой ступени; *2* — нанофильтрационный аппарат второй ступени; *3* — обратноосмотический аппарат третьей ступени; *4* — обратноосмотический аппарат четвертой ступени; *5* — нанофильтрационные аппараты-концентраторы первой ступени; *6* — нанофильтрационные аппараты-концентраторы второй ступени

Fig. 16. The balance flow diagram of landfill leachate treatment using a reverse osmosis unit having the capacity of 5,000 liters per hour. The concentrate consumption rate is reduced to 0.25 m³ hour: *1* — 1st stage main pump; *2* — 2nd stage nanofiltration unit; *3* — 3rd stage reverse osmosis unit; *4* — 4th stage reverse osmosis unit; *5* — 1st stage nanofiltration concentration unit; *6* — 2nd stage nanofiltration concentration unit

• затрат на реагенты: ингибиторы отложений карбоната кальция, дозируемые в исходную воду; моющие растворы для отмывки мембран и растворения отложений органических и неорганических веществ; реагенты для осаждения органических загрязнений при предварительной обработке воды (коагулянты и флокулянты). Результаты расчетов представлены в табл. 3. Расчеты затрат проводились для установки производительностью 5 м^3/ч.

Для преодоления основных недостатков традиционной «кайзеровской» схемы (сокращения эксплуатационных расходов и решения проблем концентратов) авторами была разработана новая комбинированная схема [28–33], позволяющая сократить как капитальные затраты (уменьшить количество использованных мембранных элементов), так и снизить затраты на электроэнергию (табл. 3). Новый подход к решению проблемы сокращения расходов концентратов заключается в реагентном осаждении ОВ, содержащихся в фильтратах ТКО. Это дало возможность сократить расход концентрата установки обратного осмоса до величины, не превышающей 1–2 % от расхода исходной воды (фильтрата ТКО), поступающей на очистку. При этом концентрат смешивается с осадком ОВ, образовавшимся после проведения процесса реагентного осаждения. Осадок после отстаивания и обезвоживания имеет влажность не более 80 %, поэтому концентрат установки, содержащий все задержанные мембранами загрязнения, удаляется вместе с осадком (табл. 2, 3). При использовании реагентной комбинированной технологии на первой ступени очистки используются нанофильтрационные мембраны, что позволяет вести процесс очистки при низких величинах рабочего давления (1,4–1,6 МПа), это на 50–60 % снижает затраты электроэнергии. При этом общее количество мембранных элементов в установке оказывается меньше, чем в «кайзеровской» схеме. Кроме того, применение нанофильтрационных мембран низкого давления на первой ступени дает возможность отказаться от применения ингибиторов (табл. 3). А снижение содержания ОВ в исходной воде позволяет в несколько раз сократить затраты на моющие растворы. Вместе с тем необходимость реагентного осаждения ОВ из исходного фильтрата ТКО требует использования реагентов в стехиометрических количествах, при этом дозы реагентов могут составлять от 5 до 7 кг на один кубический метр обрабатываемой воды. Но, несмотря на высокие расходы реагентов для осаждения, экономические расчеты показывают, что затраты на химическое осаждение оказываются существенно ниже затрат на электроэнергию и замену мембран. Сравнение затрат по «кайзеровской» схеме и в соответствии с новой комбинированной технологией представлено в табл. 3. При определении затрат на электроэнергию по «кайзеровской» схеме учитывались расходы исходной воды, поступающей на очистку. При расходе пермеата 5 м^3/ч на первую ступень мембранной установки поступают (с учетом расхода концентрата, составляющего 30 % от расхода исходной воды) 7,5 м^3/ч, при этом расход концентрата составляет 2,5 м^3/ч. В случае, если мы учитываем сброс концентрата на «тело»

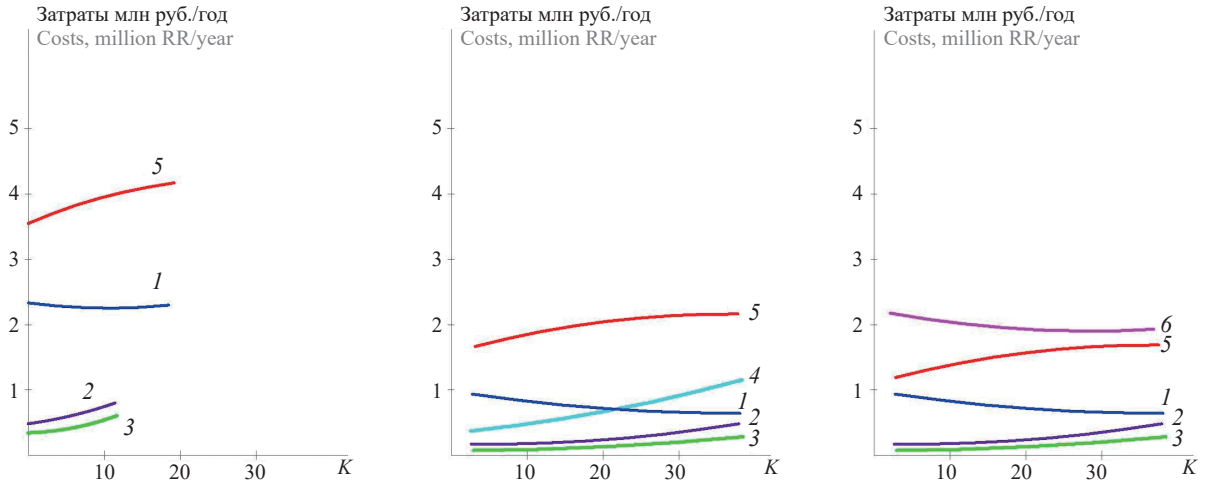


Рис. 17. Зависимость эксплуатационных затрат от *K* (для установки 5000 м^3/сут): *a* — «кайзеровская» схема с применением «морских» мембран на первой ступени; *b* — реагентно-мембранная технология; *c* — предлагаемая технология с применением нанофильтрационных мембран на первой ступени; *1* — затраты на электроэнергию; *2* — затраты на замену мембран; *3* — затраты на промывки мембран; *4* — затраты на реагенты для химического осаждения; *5* — общие эксплуатационные затраты; *6* — эксплуатационные затраты с учетом затрат на утилизацию концентрата с обезвоженным осадком

Fig. 17. Dependence between operating costs and *K* values (for the unit that has a 5,000 m^3/day capacity): *a* — kaizer technology using seawater membranes at the 1st stage; *b* — the reactant–membrane technology; *c* — a new approach using nanofiltration membranes at the 1st stage; *1* — electricity costs; *2* — membrane replacement costs; *3* — membrane washing costs; *4* — cost of reactants for chemical sedimentation; *5* — total operating costs; *6* — total operating costs, including the cost of the concentrate and dewatered sludge recovery

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6. 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6. 2021

полигона, расход исходной воды составит 11 м³/ч, а расход очищенной воды — 7 м³/ч. На второй и третьей ступенях очистки расход концентрата может составлять не более 10 % от расхода поступающей на эту ступень воды, так как обработке подвергается уже обессоленная вода. На первой ступени «кайзе-

Табл. 3. Технико-экономическое сравнение технологий

Table 3. Consolidated engineering and economic features of the three technologies

№ п/п No.	Основные технико-экономические показатели работы установки The main technical and economic indicators of the installation		Технологии Technologies		
			«Кайзер» Kaizer	Комбинированная с осаждением An integrated sedimentation technology	Без осаждения с утилизацией концентрата A concentrate reclamation technology, no sedimentation
1	Расход фильтрата ТБО, м³/час Leachate consumption rate, m³/hour		7,5	5,2	5,3
	Расход очищенной воды, м³/час Treated water consumption rate, m³/hour		5,0	5,0	5,0
	Расход концентрата, м³/час Concentrate consumption rate, m³/hour		2,5	0,2	0,3
2	Электроэнергия Electricity	Удельный расход, кВт·ч/м³ Unit consumption rate, kW·hour/m³	19	3,3–4,0	3,3
		Годовые затраты, руб. Annual costs, RR	2 200 000,00	700 000,00	700 000,00
3	Мембраны Membranes	Кол-во мембранных эл-тов, 40 % Number of membranes, 40 %	49	30	36
		Годовые затраты на замену мембран, тыс.руб. Annual membrane replacement costs, thousand RR	340	210	245
4	Химические промывки Chemical washing	Расход на 1 промывку, кг Consumption per washing, kg	100	60	
		Кол-во промывок в год Number of washings a year	8	4	6-8
		Годовые затраты на химические промывки, руб. Annual costs, RR	300 000,00	120 000,00	300 000,00
5	Ингибитор Inhibitor	Доза, мл/м³ Dose, ml/m³	10	—	—
		Годовой расход, кг Annual consumption rate, kg	500	—	—
		Годовые затраты, руб. Annual costs, RR	90 000,00	—	—
6	Коагулянт Coagulator Флокулянт Flocculator	Доза, г/л Dose, ml/m³	10 000,00	5	—
		Годовой расход, кг Annual consumption rate, kg	360	180 000,00	—
		Годовые затраты, руб. Annual costs, RR	140 000,00	500 000,00	—
7	ИТОГО: годовые эксплуатационные затраты руб. TOTAL: annual operating costs		4 540 000,00	1 530 000,00	1 245 000,00

ровской» схемы мощность электродвигателей насосов высокого давления составляет 21 кВт (для установки производительностью 5 м^3/ч). На второй и третьей ступенях процесс ведется при сниженных давлениях (1,4–1,6 МПа), и мощности электродвигателей насосов составляют по 5,5 кВт. Таким образом, общая потребляемая мощность установки производительностью 5 м^3/ч, работающей по «кайзеровской» схеме, составляет 32 кВт. Для новой комбинированной технологии, на всех ступенях которой используются низконапорные мембраны, суммарная мощность электродвигателей всех насосов не превышает 16 кВт. Годовые затраты электроэнергии определялись путем умножения мощности электродвигателей на 7000 (количество рабочих часов в год) и на тариф (5 руб./кВт·ч). Для определения требуемого количества мембранных элементов использовалась разработанная авторами методика [29, 30]. Полученные расчетным путем количества мембранных элементов «кайзеровской» схемы точно соответствуют «удельному» количеству элементов (для получения 1 м^3/ч очищенной воды) в установке, работающей на полигоне ТБО «Тимохово» в Ногинске. Количества моющих реагентов определялись, исходя из расхода моющей композиции (Трилона Б), равного 2 кг на один элемент типа 8040. Количество промывок при использовании «кайзеровской» схемы составляет 6–8 в год, при применении технологии реагентного осаждения — в 2 раза меньше (табл. 3).

Обработка результатов экспериментов позволила сделать следующие выводы:

• при обработке фильтрата ТБО с высокими значениями ХПК и общего солесодержания целесообразно использовать на первой ступени очистки нанофильтрационные мембраны, что позволяет сократить расход концентрата установки обратного осмоса;

• применение нанофильтрационных мембран существенно снижает величину эксплуатационных затрат при очистке фильтратов ТБО;

• для упрощения утилизации концентрата установки обратного осмоса целесообразно разделить концентрат на два потока: поток с содержанием ОВ и поток с содержанием минеральных солей.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. *Abdel-Shafy H.I., Mansour M.S.M.* Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization // Egyptian Journal of Petroleum. 2018. Vol. 27. Issue 4. Pp. 1275–1290. DOI: 10.1016/j.ejpe.2018.07.003

2. *Wiszniowski J., Robert D., Summer-Gorska J., Miksh K., Weber J.V.* Landfill leachate treatment methods: A review // Environmental Chemistry Letters. 2006. Vol. 4. Issue 1. Pp. 51–61. DOI: 10.1007/s10311-005-0016-z

3. *Nawaz T., Rahman A., Pan S., Dixon K., Petri B., Selvaratham T.* A review of landfill leachate treatment by microalgae: current status and future directions // Processes. 2020. Vol. 8. Issue 4. P. 384. DOI: 10.3390/pr8040384

4. *Jalil M.H.E., Elkrauni H., Khamar M., Bouyahya A., Elhamri H., Cherkaoui E. et al.* Physicochemical characterization of leachates produced in the Rabat-Salé-Kénitra Region landfill technical center and monitoring of their treatment by aeration and reverse osmosis // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 150. P. 02013. DOI: 10.101/e3sconf/20205002013

5. *Ribera-Pi J., Badia-Fabregat M., Espi J., Clarens F., Jubany I., Martinez-Llad X.* Decreasing environmental impact of landfill leachate treatment by MBR, RO and EDR hybrid treatment // Environmental Technology. 2020. Pp. 1–15. DOI: 10.1080/09593330.2020.1734099

6. *Wu C., Chen W., Gu Z., Li Q.* A review of the characteristics of Fenton and ozonation systems in landfill leachate treatment // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 762. P. 143131. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143131

7. *Ke L., Lu Y.* Study on upgrading and engineering design of leachate treatment facilities in a landfill in Beijing // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 687. Issue 1. P. 012025. DOI: 10.1088/1755-1315/687/1/012025

8. *Ahn W.-Y., Kang M.-S., Yim S.-K., Choi K.-H.* Advanced landfill leachate treatment using an integrated membrane process // Desalination. 2002. Vol. 149. Issue 1–3. Pp. 109–114. DOI: 10.1016/s0011-9164(02)00740-3

9. *Weber B., Holz F.* Landfill leachate treatment by reverse osmosis // Effective Industrial Membrane Processes: Benefits and Opportunities. 1991. Pp. 143–154. DOI: 10.1007/978-94-011-3682-2_10

10. *Chianese A., Ranauro R., Verdone N.* Treatment of landfill leachate by reverse osmosis // Water Research. 1999. Vol. 33. Issue 3. Pp. 64–652. DOI: 10.1016/s0043-1354(98)00240-1

11. *Ushikoshi K., Kobayashi T., Uematsu K., Toji A., Kojima D., Matsumoto K.* Leachate treatment by the reverse osmosis system // Desalination. 2002. Vol. 150. Issue 2. Pp. 121–129. DOI: 10.1016/s0011-9164(02)00937-2

12. *Amokrane A., Comel C., Veron J.* Landfill leachates pretreatment by coagulation-flocculation // Water Research. 1997. Vol. 31. Issue 11. Pp. 2775–2782. DOI: 10.1016/s0043-1354(97)00147-4

13. *Linde K., Jonsson A.-S.* Nanofiltration of salt solutions and landfill leachate // Desalination. 1995. Vol. 103. Issue 3. Pp. 223–232. DOI: 10.1016/0011-9164(95)00075-5

14. *Kosutic K., Dolar D., Strmecky T.* Treatment of landfill leachate by membrane processes of nanofiltration and reverse osmosis // Desalination and Water Treatment. 2015. Vol. 55. Issue 10. Pp. 2680–2689. DOI: 10.1080/19443994.2014.939863

15. *Peters T.A.* Purification of landfill leachate with reverse osmosis and nanofiltration // Desalination. 1998. Vol. 119. Issue 1–3. Pp. 289–293. DOI: 10.1016/s0011-9164(98)00171-4

16. *Li G., Wang, W., Du Q.* Applicability of nanofiltration for the advanced treatment of landfill leachate // Journal of Applied Polymer Science. 2010. DOI: 10.1002/app.31769

17. *Mariam T., Nghiem L.D.* Landfill leachate treatment using hybrid coagulation-nanofiltration processes // Desalination 2010. Vol. 250. Issue 2. Pp. 677–681. DOI: 10.1016/j.desal.2009.03.024

18. *Mojiri A., Zhou J.L., Rathaweera H., Ohashi A., Ozaki N., Kidaichi T. et al.* Treatment of landfill leachate with different techniques: an overview // Journal of Water Reuse and Desalination. 2021. Vol. 11. Issue 1. Pp. 69–96. DOI: 10.2166/wrd.2020.079

19. *Mojiri A., Aziz H.A., Aziz S.Q.* Trends in physical-chemical methods for landfill leachate treatment // International Journal of Scientific Research in Environmental Sciences. 2013. Pp. 16–25. DOI: 10.12983/ijsres-2013-p016-025

20. *Andrianov A., Pervov A., Popov K., Rudakova G.* Applications of reverse "open channel" membrane to utilize ro retentate that contains antiscalants // Desalination for the Environment: Clean Water and Energy. 2016.

21. *Chiannese A., Ranauro R., Verdone N.* Treatment of landfill leachate by reverse osmosis // Water Research. 1999. Vol. 33. Issue 3. Pp. 647–652. DOI: 10.1016/s0043-1354(98)00240-1

22. *De Almeida R., de Souza Couto J.M., Gouvea R.M.* Nanofiltration applied to the landfill leachate treatment and preliminary cost estimation // Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy. 2020. Vol. 38. Issue 10. Pp. 1119–1128. DOI: 10.1177/0734242X20933333.

23. *De Almedia R., Maia D., Quintaes B.R.* Cost estimation of landfill leachate treatment by reverse osmosis in a Brazilian landfill // Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy. 2020. Vol. 38. Issue 10. Pp. 1087–1092. DOI: 10.1177/0734242X20928411

24. *Wilf M.* The guidebook to membrane for wastewater reclamation. Balaban Desalination Publishing, 2010. Vol. 788.

25. *Zhou D., Zhu L., Fu Y., Zhu M., Xue l.* Development of lower cost seawater desalination processes using nanofiltration technologies // Desalination. 2015. Vol. 376. Pp. 109–116. DOI: 10.1016/j.desal.2015.08.020

26. *Morillo J., Usero J., Rosado D., El Bakouri H., Riaza A., Bernaola F.-J.* Comparative study of brine management technologies for desalination plants // Desalination. 2014. Vol. 336. Pp. 32–49. DOI: 10.1016/j.desal.2013.12.038

27. *Hilal N., Al-Zoubi H., Mohammad A.W., Darwish N.A.* Nanofiltration of highly concentrated salt solutions up to seawater salinity // Desalination. 2005. Vol. 184. Issue 1–3. Pp. 315–326. DOI: 10.1016/j.desal.2005.02.062

28. *Shirkova T., Pervov A., Kiryushina M.* Development of a new technique to treat municipal waste landfill leachate with low pressure reverse osmosis and nanofiltration membranes // ESU (Euroasia-Science). 2020. No. 5 (74). Pp. 11–19.

29. *Wang Z., Desmukh A., Du Y., Elimeiech M.* Minimal and zero liquid discharge with reverse osmosis using low-salt-rejection membranes // Water Research. 2020. Vol. 170. P. 115317. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115317

30. *Bartholomew T.V., Mey L., Arena J.T., Siefert N.S., Mauter M.S.* Osmotically assisted reverse osmosis for high salinity brine treatment // Desalination. 2017. Vol. 421. Pp. 3–11. DOI: 10.1016/j.desal.2017.04.012

31. *Pervov A.G., Shirkova T.N., Tikhonov K.V.* Calculation of reverse osmosis and nanofiltration membrane facilities to process solid waste // Membranes and Membrane Technologies. 2020. Vol. 2. Issue 5. Pp. 296–309. DOI: 10.1134/s2517751620050054.

32. *Pervov A.G., Shirkova T.N.* Treatment of municipal landfill leachate with low pressure reverse osmosis and nanofiltration membranes. Book of abstracts // SinoRussian ASRTU Forum, Ecology and Environmental Sciences, October 21–22, 2020. Ekaterinburg, Russia (Association of Sino-Russian Technical Universities).

33. *Abbas A.A., Jingsong G., Ping L.Z., Ya P.Y., Al-Rekabi W.S.* Review on landfill leachate treatments // American Journal of Applied Sciences. 2009. Vol. 6. Issue 4. Pp. 672–684. DOI: 10.3844/ajas.2009.672.684

Поступила в редакцию 15 февраля 2021 г.
Принята в доработанном виде 4 июня 2021 г.
Одобрена для публикации 8 июня 2021 г.

Об авторах: **Алексей Германович Первов** — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строи-**

тельный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 168126; Scopus: 6603768203, ResearcherID: R-8851-2016, ORCID: 0000-0002-7518-2342; ale-pervov@yandex.ru;

Татьяна Николаевна Ширкова — аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1226-4625; ResearcherID: AAQ-4914-2021, ORCID: 0000-0002-2471-6826; mabell@bk.ru;

Дмитрий Владимирович Спицов — кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, исполняющий обязанности директора института Инженерно-экологического строительства и механизации; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 531559; Scopus: 57194449123, ResearcherID: AAG-2158-2020, ORCID: 0000-0001-6252-9485; spitsovdv@mgsu.ru.

Received February 15, 2021.
Adopted in revised form on June 4, 2021.
Approved for publication on June 8, 2021.

Bionotes: **Alexey G. Pervov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 168126, Scopus: 6603768203, ResearcherID: R-8851-2016, ORCID: 0000-0002-7518-2342; ale-pervov@yandex.ru;

Tatiana N. Shirkova — postgraduate student of the Department of Water Supply and Sanitation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1226-4625, ResearcherID: AAQ-4914-2021, ORCID: 0000-0002-2471-6826; mabell@bk.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, Scopus: 57194449123, ResearcherID: AAG-2158-2020, ORCID: 0000-0001-6252-9485; spitsovdv@mgsu.ru.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 16. Выпуск 6, 2021**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 16. Issue 6, 2021**

UDC 620.179.13 DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.720-729

A theoretical and experimental study of transient characteristics of the heat exchange in a thermal control system

Rustam Sh. Mansurov, Yuri E. Voskoboinikov, Vasilisa A. Boeva
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (NSUACE (Sibstrin)); Novosibirsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The "Heater-Blower-Room" thermal control system represents three different interconnected subsystems. It is necessary to study the transient characteristics of the heat exchange process, that is underway in the subsystems, including informative impulse responses, to stabilize the system operation. It is a non-parametric problem, and its solution requires identification algorithms.

Materials and methods. Mathematical models of the subsystems represent the Volterra integral equation of the first kind with an undetermined difference kernel, or an impulse response. An impulse response evaluation is a solution to this equation in respect of registered noisy input and output values. The problem is to evaluate unknown impulse responses for the subsystems where the output of one subsystem is the input of another one. This problem is ill-posed, and features of identification-focused experiments do not allow to apply computational methods of classical regularization algorithms. The co-authors propose two specific non-parametric identification algorithms where impulse responses are evaluated using stable first derivatives by means of smoothing cubic splines through the optimal smoothing parameter selection on the basis of the statistical optimality criterion.

Results. The co-authors solve inverse problems of impulse response identification and direct problems of heat flux reaction prediction. The research results demonstrate a high level of convergence between the evaluated data and observation findings. Both experimental and theoretical results represent the findings of the research performed by the co-authors.

Conclusions. The results have proven the efficiency of the algorithms proposed for the identification of solutions to the problems of complex technical systems.

KEYWORDS: thermal control system, black box model, non-parametric problem of identification, ill-posed problem, Volterra integral equation of the first kind, stable identification algorithm, transient process, relative excess heat

Acknowledgements. The reported study was funded by RFBR, project No 20-38-90041.

FOR CITATION: Mansurov R.Sh., Voskoboinikov Yu.E., Boeva V.A. A theoretical and experimental study of transient characteristics of the heat exchange in a thermal control system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(6):720-729. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.720-729 (rus.).

Теоретическое и экспериментальное исследование переходных характеристик теплообмена в системе терморегулирования

Р.Ш. Мансуров, Ю.Е. Воскобойников, В.А. Боева
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин) (НГАСУ (Сибстрин)); г. Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Система терморегулирования «Обогреватель-вентилятор-помещение» представляет собой три разные взаимосвязанные подсистемы. Для стабилизации работы системы необходимо изучить переходные характеристики процесса теплообмена в подсистемах, в том числе информативные импульсные характеристики. Данная задача является непараметрической, а для ее решения требуется произвести поиск алгоритмов.

Материалы и методы. Математические модели подсистем представляют собой интегральное уравнение Вольтерры первого рода с неопределенным разностным ядром или импульсным откликом. Оценка импульсного отклика является решением указанного уравнения для установленных входных и выходных шумовых характеристик. Задача заключается в оценке неизвестных импульсных откликов в подсистемах, в которых выходная характеристика одной подсистемы служит входной характеристикой другой подсистемы. Задача — некорректна, а эксперименты направленные на поиск решения не позволяют применить вычислительные методы классических алгоритмов регуляризации. Авторы предлагают два особых непараметрических метода идентификации, при которых импульсные отклики оцениваются на основании первых производных с помощью кубических сглаживающих сплайнов на основе выбора оптимального параметра сглаживания, установленного по критерию статистической оптимальности.

Результаты. Авторы решают обратные задачи идентификации импульсного отклика и прямые задачи прогнозирования реакции теплового потока. Исследование показало высокую сходимость расчетных данных с данными наблюдения. Как теоретические результаты, так и результаты эксперимента представляют собой итог исследований, проведенных авторами настоящей работы.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 16. Выпуск 6, 2021**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 16. Issue 6, 2021**

© Rustam Sh. Mansurov, Yuri E. Voskoboinikov, Vasilisa A. Boeva
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Вывод. Результаты доказали эффективность алгоритмов решения задач сложных технических систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система терморегулирования, модель черного ящика, непараметрическая проблема идентификации, некорректная задача, интегральное уравнение Вольтерра первого рода, стабильный механизм идентификации, переходный процесс, относительное избыточное тепло

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90041.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Мансуров Р.Ш., Воскобойников Ю.Е., Боева В.А.* A Theoretical and experimental study of transient characteristics of the heat exchange in a thermal control system // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 6. С. 720–729. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.720-729

INTRODUCTION

In practical terms, there are thermal control systems that can be considered as a combination of several different simpler subsystems characterized by various physical processes that are underway inside them. The major challenge is to stabilize the climate parameters of such systems [1, 2]. Fluctuating thermal agitations in a system may cause unstable system operation [3]. The system's response to agitations is a transient process that determines the climate parameters and the system stability [4].

In this context, there is a need for an experimental research on the transient characteristics of heat exchange in climate systems [5, 6]. An impulse response is considered to be the most informative characteristic in the automation control theory [3]. The information about an impulse response allows to simulate different operation modes, including the hazardously critical operation of systems, and formulate the optimal system control regularities [4, 5].

This paper addresses the study of the "Heater-Blower-Room" thermal control system that has several interconnected subsystems [6]. The main objective is the non-parametric identification of impulse responses in the thermal control system and its subsystems. The supplementary objectives include:

- the formulation of the mathematical model of the thermal control system;
- the research on inputs and outputs of the subsystems;
- stable non-parametric identification of an impulse response when an input is a step signal;
- stable non-parametric identification of an impulse response when an input is an arbitrary signal.

To attain these objectives, the authors use the methods and algorithms described in [6–9]. This paper addresses the application of these methods and algorithms in the course of the experiments reported in [2, 10].

MATERIALS AND METHODS

Let us explain some fundamentals of the physical processes [11] that are underway in the system and classify the features of inputs and outputs of the subsystems for the successful structural identification of a thermal control system and its subsystems.

Fig. 1 demonstrates the circulation of heat fluxes generated/absorbed by a moist air flux passing though the elements of the thermal control system [11]. The air mass flow is defined as $G = \rho(T_3)uF$, where F, in m^2, is the sectional area of an air duct at the points of u velocity sensors and temperature T_3 sensors; $\rho(T_3)$, in kg/m^3, is the density of dry air at temperature T_3. The heat absorbed by the heat flux from the "Heater" element is defined as $Q_h = c_a G \Delta T_h$, the heat absorbed from the "Blower" element is defined as $Q_b = c_a G \Delta T_b$, the heat absorbed from the "Unit" subsystem is defined as $Q_u = c_a G \Delta T_u$, where c_a is the thermal capacity of the air; $\Delta T_h = T_2 - T_1$, $\Delta T_b = T_3 - T_2$, $\Delta T_u = T_3 - T_1$. The heat accumulated by the heat flux in the "Room" element is defined as $Q_r = c_a G \Delta T_r$, where $\Delta T_r = T_4 - T_3$. The heat outflow into the environment from the "Room" element is defined as $Q_e = c_a G \Delta T_e$, where $\Delta T_e = T_4 - T_1$.

In paper [2], relative excess heat Q_i^r is formulated as a similarity parameter that describes transition processes. It allows to identify the trends of transition processes in the moist air flux passing though the elements of the thermal control system. Relative excess heat is defined as:

$$Q_i^r = \frac{Q_i(\tau) - Q(0)}{|Q_i(\tau_*) - Q_i(0)|}, \; i = 1 \ldots 4, \qquad (1)$$

where Q_i^r, if i = 1, relative excess heat Q_h^r is generated/absorbed by the moist air flux passing though the "Heater" element; if i = 2, relative excess heat Q_b^r is generated/absorbed by the moist air flux passing though the "Blower" element; if i = 3, relative excess heat Q_r^r is assimilated by the heat flux passing though the "Room" element; if i = 4, relative excess heat Q_u^r is generated/absorbed by the moist air flux passing though

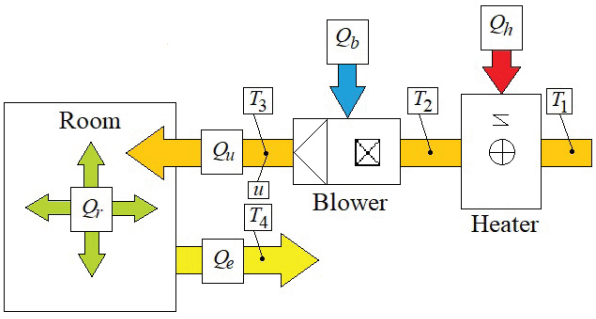


Fig. 1. Heat fluxes in the "Heater-Blower-Room" thermal control system

the "Unit" subsystem; $Q_i(\tau)$ is the heat generated during time τ; $Q_i(0)$ is the heat generated during initial time $\tau = 0$; $Q_i(\tau_*)$ is the heat generated during final time $\tau_* = 500$ sec.

As a result of experimental data processing, the evolution of relative excess heat values Q_h^r, Q_b^r, Q_r^r, Q_u^r in the heat flux, passing through the "Heater-Blower-Room" system, is demonstrated in Fig. 2. The "Blower" operation mode is "0.4", the "Heater" operation mode is "0.01→0.1".

Fig. 3 shows the block diagram of the "Heater-Blower-Room" thermophysical system. The thermal control subsystem "Heater-Blower", previously called the "Unit", is a stationary linear system that can be represented as a combination of two simpler stationary linear subsystems, the "Heater" and the "Blower". Stationary linear properties of these subsystems were demonstrated in the course of the experiments. Physical processes in the "Room" subsystem are characterized as unpredictable and stochastic, so this subsystem is not included in the general identification process. At the same time, it is experimentally proved that the evolution of relative excess heat Q_r^r is compensated by the evolution of relative excess heat Q_u^r.

Physical processes underway in the thermal control system and its subsystems are too complicated to be adequately described in the language of mathematics. Therefore, let us assume that the model of this system is a "black box" that has an input and an output. Hence, the model can be formulated in the "input-output" terms in the form of the Volterra integral equation of the first kind to solve the identification problem [12–16]

$$\int_0^t \varphi_n(t-\tau)k_n(\tau)\mathrm{d}\tau = f_n(t),\ t \in [0,T], \qquad (2)$$

where n is the subsystem indication; $k_n(\tau)$ is the impulse response of a subsystem, or the kernel of the integral equation (2); $\varphi_n(\tau)$ is the input of the subsystem; $f_n(t)$ is the output of the subsystem. In Fig. 3 $\varphi(\tau) = \varphi_1(\tau)$, and it demonstrates the productivity shock at 0.1 as the input of the "Unit" and "Heater" subsystems; $f_1(t) = Q_h^r$ is the output of the "Heater" subsystem, and the input $\varphi_2(\tau)$ of the "Blower" subsystem in operation mode "0.4"; $f_2(t) = Q_b^r$ is the output of the "Blower" subsystem; $f(t) = Q_u^r$ is the output of the "Unit" subsystem and the input of the "Room" subsystem. Signals $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f(t)$ are a priori inexact noisy observations contaminated by measurement errors [17] made by the laboratory facility described in [10]. All the system signals are equally spaced, broken down into $N = 500$ samples with a time step $\Delta t = 1$ sec. As a result of the experimental study, it is discovered that the acceleration of the system elements exceeded 20 sec. Such input-response delays are typical for dy-

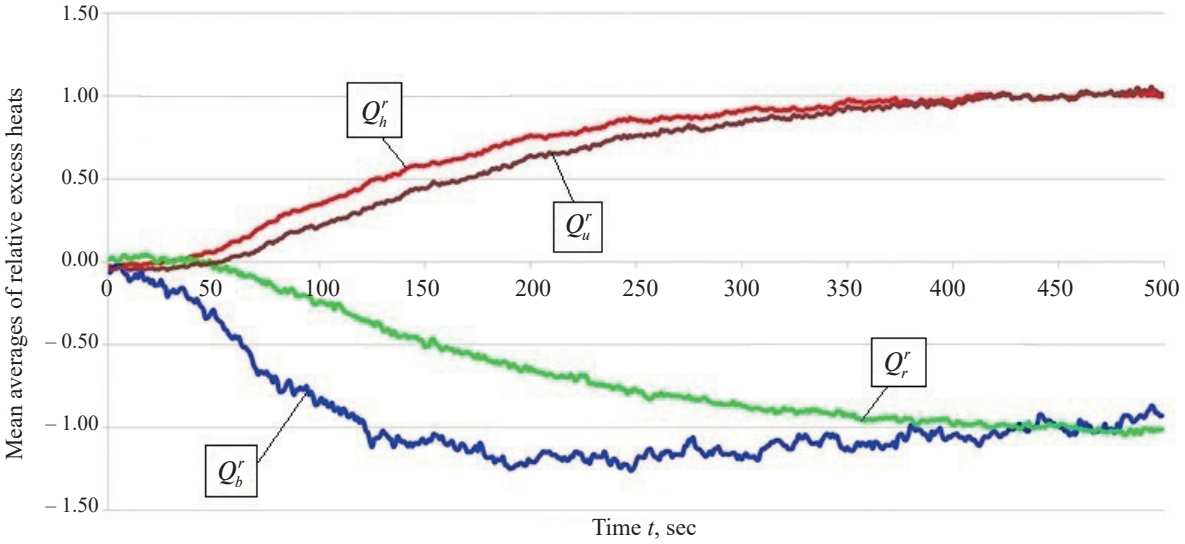


Fig. 2. Experimental evolutions of relative excess heat values of the elements of the "Heater-Blower-Room" thermal control system in the flux heating mode

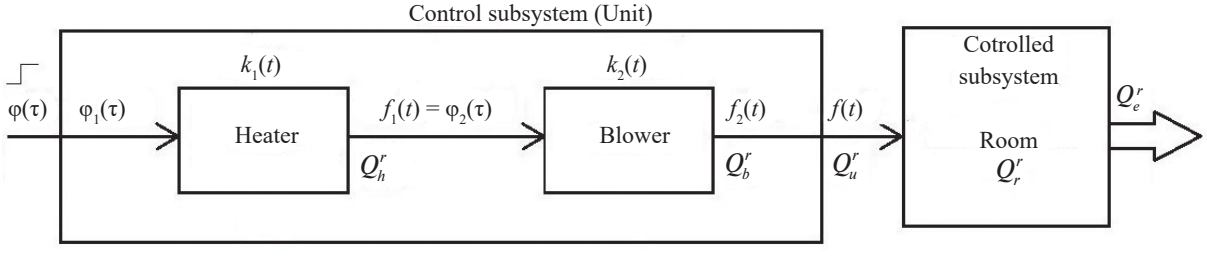


Fig. 3. A block diagram of the "Heater-Blower-Room" thermal control system

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

namic lags in responding to inputs after some time [18]. Hence, input delays were detected for $f_1(t)$ in 29 sec, for $f_2(t)$ — in 33 sec, for $f(t)$ — in 55 sec. For the purpose of simulation, all delays were rejected in the course of evaluation of linear impulse responses, and the delay effect was compensated by the time lag element [19].

For the purposes of simulation and operation of the system, described by the mathematical model in form (2), a non-parametric identification problem must be solved. It consists of evaluations of the impulse response obtained from "Unit" subsystem $k(\tau)$, "Heater" subsystem $k_1(\tau)$, and "Blower" subsystem $k_2(\tau)$, when the productivity shock in the "Heater" element is registered as 0.1 in the process of measuring noisy input and output parameters of the moist air flux. This problem is ill-posed [20, 21] due to the probable solution instability [22] caused by initial data measurement noises [17, 23–25]. In terms of causal relationships, the problem is inverse [21].

A stable solution to the problem can be generated using the authors' non-parametric identification algorithm designated for technical systems reported in [6–8]. In this algorithm, an impulse response is evaluated by smoothing cubic splines with optimal smoothing parameter selection on the basis of the statistical optimality criterion [9].

RESULTS OF THE RESEARCH

Non-parametric identification of the subsystems of a thermal control system can be divided into the following stages.

Stage 1. Impulse response evaluation of the "Heater" subsystem

Since the constant-amplitude step signal $\varphi_1(\tau)$ is applied to the input of the "Heater" subsystem at time $t = 0$, impulse response $k_1(\tau)$ can be evaluated by output $f_1(t)$ differentiation when input $\varphi_1(\tau)$ is represented by the Heaviside function [26] with regard for the amplitude and $K = 0.1$ coefficient:

$$k_n(t) = \frac{1}{K} \cdot \frac{d}{dt} f_n(t),\ t \in [0, T], \qquad (3)$$

where n is the subsystem indication, and for the "Heater" subsystem $n = 1$.

Despite the established numerical differentiation algorithms, there arises a problem of an unstable solution related to different problem statements [27, 28]. Even low measurement noise in the output signal can cause significant impulse response evaluation errors. To ensure a stable impulse response evaluation, it is necessary to smooth, or filtrate, and differentiate the noisy output $f_1(t)$ [9]. Cubic splines [29–33], having natural boundary conditions, are used for this purpose due to their relative implementation simplicity and mathematical software availability [33, 34].

Contrary to interpolating splines [35], smoothing cubic splines are not constructed through the pre-set points of a signal, so they are widely used for noisy data filtration. Smoothing parameter α adjusts the smoothness of smoothing cubic splines, and the measurement noise filtration error as a consequence. The statistical optimality criterion [8, 36] allows to calculate value α_W of optimal smoothing parameter α_{opt} that minimizes the mean-root square value [25, 26, 37]. Let us further assume that smoothing cubic splines are calculated at $\alpha = \alpha W$. The calculation of smoothing cubic splines coefficients $a_i, b_i, c_i, d_i, i = 1 \ldots N$ within set α_W is addressed in [27, 29, 38].

Fig. 4 shows impulse response evaluations $\hat{k}_1(t)$ performed by interpolating splines (the black line), and smoothing cubic splines (the blue line). Smoothing cubic splines with the appropriate smoothing parameter selection procedure, that ensures stable differentiation of noisy data, have proven their efficiency. Differentiation by means of interpolating splines generated undesired results.

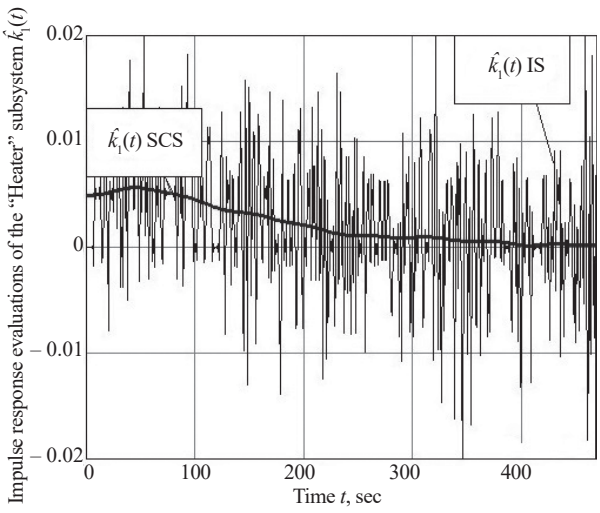


Fig. 4. Impulse response evaluations in the "Heater" subsystem

The reason for the initial nonzero values of impulse responses (Fig. 4–6) is the testing environment of the field observations performed in a series of experiments. The pre-set productivity of the "Heater" element was ensured by power controller TTS-25 that generated a sinewave with a pre-set period of 60 sec. In total, eighteen consecutive series of experiments, $N = 500$ sec each, were conducted. Experiments, that had even numbers, entailed a sequential productivity increase of the "Heater" element, while experiments that had odd numbers, entailed its sequential productivity reduction. After that, the observational data were averaged over nine even heating experiments and nine odd cooling experiments.

The problem of the "Heater" subsystem is the heat flux $f_1(t)$ reaction prediction by means of agitation $\varphi_1(\tau)$ and the evaluated impulse response $\hat{k}_1(t)$. Predicted values $\hat{f}_1(t_i)$, $i = 1 \ldots N$ of the "Heater" subsystem's output $f_1(t)$ are calculated as follows [12–16, 39]:

$$\hat{f}_n(t_i) = \int_0^{t_i} \hat{k}_n(t_i - \tau)\, \varphi_n(\tau) d\tau, \qquad (4)$$

where n is the subsystem indication.

The difference between predicted output values and observational output values is identified as follows:

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6. 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6. 2021

$$\delta f_n = \frac{\sum_i \left| f_n(t_i) - \hat{f}_n(t_i) \right|}{\sum_i \left| \hat{f}_n(t_i) \right|} \ 100 \ \%. \qquad (5)$$

The value of δf_1 calculated by (5) is 1.9 % which evidences a highly qualitative convergence between the calculations and the experiments.

Stage 2. Impulse response evaluation of the "Blower" subsystem

When evaluating impulse response $k_2(\tau)$, input $\varphi_2(\tau)$ is considered as the arbitrary signal $f_1(t)$. By means of differentiating equation (2) with respect to t, and simply transforming the new one, the Volterra integral equation of the second kind [39] can be obtained:

$$k_n(t) + \frac{1}{\varphi_n(0)} \int_0^t \varphi_n'(t-\tau) k_n(\tau) d\tau = \frac{f_n'(t)}{\varphi_n(0)}, \ t \in [0, T], \qquad (6)$$

where n is the subsystem indication, and for the "Blower" subsystem $n = 2$.

The solution to integral equation (6) is a well-posed problem [28], but it also encompasses two challenges. Firstly, it is necessary to construct stable first derivatives of noisy inputs and outputs, secondly, the convolution integral must be calculated with minimum integration errors [26] to reduce the systematic error of the identification algorithm. These problems can be solved by smoothing the aforementioned cubic splines.

To evaluate the impulse response, we should calculate smoothing cubic [33, 36, 40] splines of inputs and outputs and construct corresponding first derivatives [7, 8]. Then $(N-1)' \ (N-1)$ matrix elements Φ are formed according to the rules specified in [7]:

$$\Phi_{i,j} = \begin{cases} 0 \quad \text{for } i < j \\ \int_{t_{i-j+1}}^{t_{i-j+2}} S'_{\varphi_n,\alpha}(\tau) d\tau \quad \text{for } i \geq j \end{cases}, \qquad (7)$$

where $i = 1...N$, $j = 1...N-1$; $S'_{\varphi_n,\alpha}(\tau)$ is the first derivative of the smoothing cubic spline of an input for the pre-set smoothing parameter α_W. The exact efficient calculation of the convolution integral is performed using a quadrature formula that has smoothing cubic spline coefficients [29] used to minimize the error of the algorithm. Matrix $\mathbf{\Phi}$ allows to approximate the Volterra integral equation of the second kind (6) by a system of linear equations [4]:

$$\left(\boldsymbol{I} + \frac{1}{S_{\varphi_n,\alpha}(t_1)} \mathbf{\Phi} \right) \cdot \hat{\boldsymbol{k}}_n = \frac{1}{S_{\varphi_n,\alpha}(t_1)} \hat{\boldsymbol{f}}_n', \qquad (8)$$

where $\boldsymbol{I}$ is an identity matrix; $\hat{\boldsymbol{f}}_n'$ is a vector of output first derivatives at mesh points calculated by smoothing cubic splines; $\hat{\boldsymbol{k}}_n$ is the solution vector, and its components are the evaluations for the identified impulse response values $k_n(t_i)$; n is the subsystem indication.

Fig. 5 shows impulse response evaluations $\hat{k}_2(t)$ obtained by interpolating splines (the black line), and by smoothing cubic splines (the blue line). The problems of the "Blower" subsystem are the heat flux $f_2(t)$ reaction prediction by agitation $\varphi_2(\tau)$ and the evaluated impulse response $\hat{k}_2(t)$. The difference between predicted output values and observational output values δf_2 calculated using (5) is 5 %.

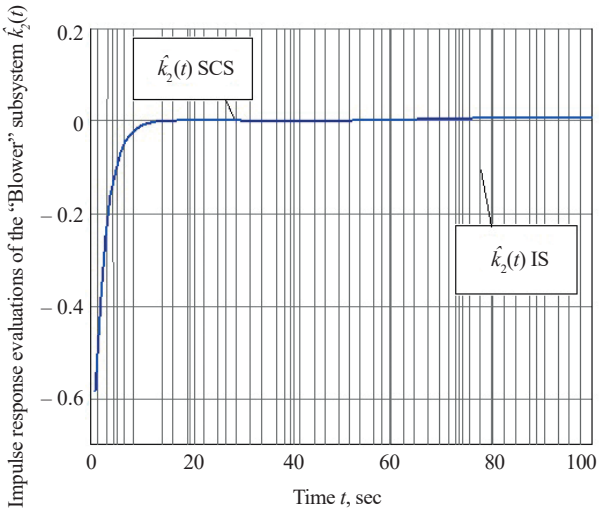


Fig. 5. Impulse response evaluations in the "Blower" subsystem

Stage 3. Impulse response evaluation of the "Unit" subsystem

The constant-amplitude 0.1 step signal $\varphi(\tau)$, same as $\varphi_1(\tau)$ in the "Heater" subsystem, is applied to the input of the "Unit" subsystem at time $t = 0$. The impulse response $k(t)$ evaluation algorithm is the same as at Stage 1.

Fig. 6 shows impulse response evaluations $\hat{k}(t)$ obtained by interpolating splines (the black line), and by smoothing cubic splines (the blue line). The problems of the "Unit" subsystem are the heat flux $f(t)$ reaction prediction using agitation $\varphi(\tau)$ and the evaluated impulse response $\hat{k}(t)$. The difference between predicted output values and observational output values δf calculated using (5) is 1.6 %.

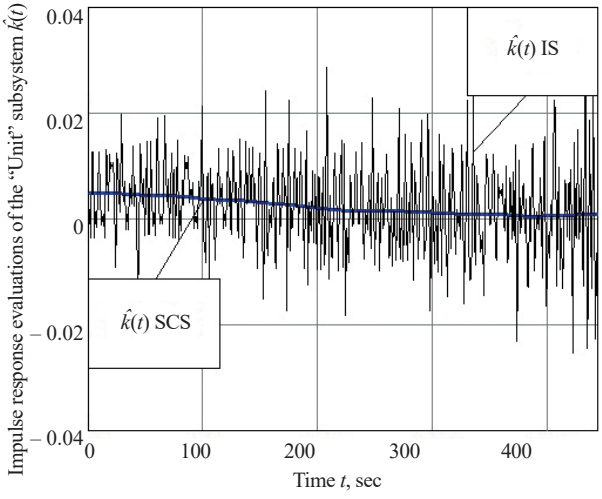


Fig. 6. Impulse response evaluations in the "Unit" subsystem

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

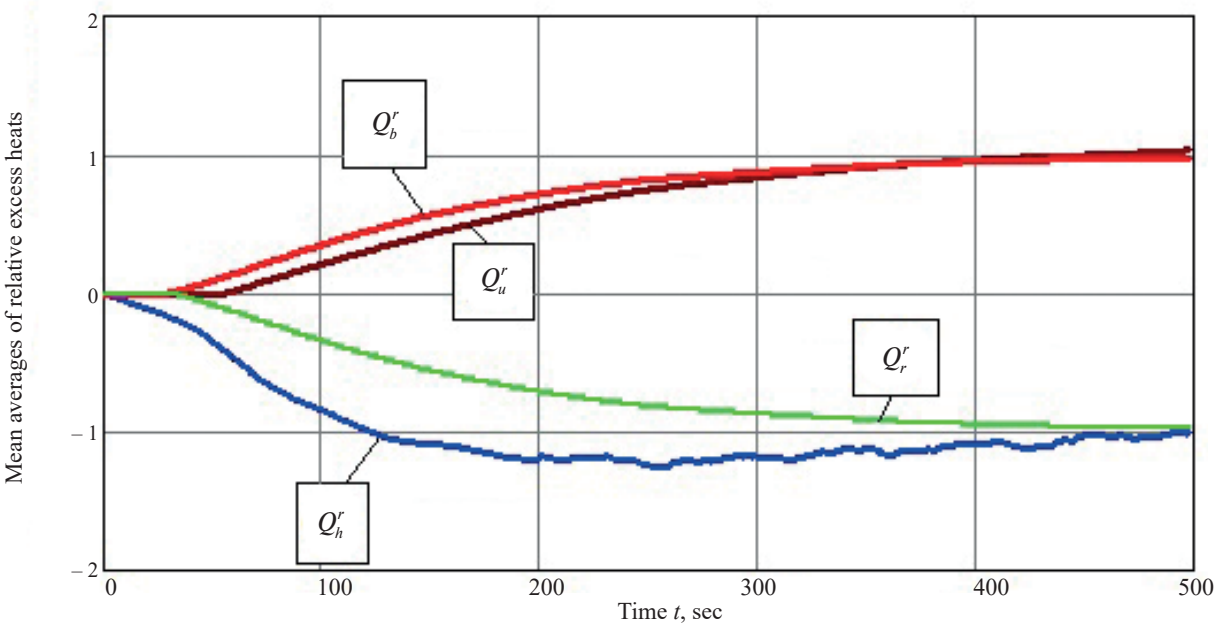


Fig. 7. Theoretical transient evolutions of relative excess heat values of the elements of the "Heater-Blower-Room" thermal control system in a flux heating mode

Following the processing of these problems with the help of evaluated impulse responses, transient evolutions of relative excess heat values Q_h^r, Q_b^r, Q_r^r, Q_u^r in a heat flux, passing through the "Heater-Blower-Room" system, are demonstrated in Fig. 7. The "Blower" operation mode is "0.4", the "Heater" operation mode is "0.01→ 0.1".

The co-authors have identified a high level of convergence between the experimental relative excess heat values, identified in the process of observation (Fig. 2), and calculated relative excess heat values, identified by means of evaluations (Fig. 7). The averaged difference between the observational and evaluated data is 3–4 %, and the maximum difference is 7.8 %, which evidences high qualitative convergence between the calculations and the experiments.

CONCLUSION AND DISCUSSION

A non-parametric identification of complex dynamic systems is a rather complicated and time-consuming problem. On the one hand, this complexity is explained by the ill-posed nature of the solution to the Volterra integral equation of the first kind, and on the other hand, it is caused by different types of inputs and outputs within the identified systems. The algorithms proposed in the paper allow to perform stable non-parametric identification both for the whole system and its elements with regard for the specific features of the problem in question.

Smoothing cubic splines allow to construct an efficient algorithm for the filtration of various statistical measurement noises interfering with the inputs and outputs of the system. Due to the application of smoothing cubic splines, the value of the identification error depends on differentiation errors of inputs involving matrix Φ elements, and differentiation errors of outputs involving vector $\hat{f}'$ components. An optimal smoothing parameter selection, made on the basis of the statistical optimality criterion, means minimum differentiation errors for noisy inputs and outputs, and minimum identification errors as a consequence. Note that in case of anomalous measurements of inputs and outputs, the robust algorithm reported in [8] can be used for a stable non-parametric identification.

This successful solution to the engineering non-parametric identification problem is applicable to the complex thermophysical system "Heater-Blower-Room" if observational data are noise-contaminated. It has proven the efficiency of non-parametric identification algorithms used to solve applied problems. The research results allow to use these algorithms for the identification of impulse responses in other complex dynamic systems.

REFERENCES

1. Mansurov R.Sh., Kuvshinov Yu.Ja. Intellectualization of control systems of room micro-climate processes evolvement. *News of Kabardino-Balkarskij science Center of Russian science Academy*. 2012; 2-2(46):85-93. (rus.).

2. Mansurov R.Sh., Rudyak V.Ya. Transients processes in the system the heater-fan when changing the operating mode of the fan. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2019; 3:50-63. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-723-3-50-63 (rus.).

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

3. Kamenskiy S.V., Frantsuzova G.A., Chikil'din G.P., Zhmud' V.A., Vostrikov A.S., Voskoboynikov Yu.E. et al. *Systems of automation control theory, mechatronics and robotics technology : monography*. Novosibirsk, NSTU Publishing, 2017; 210. (rus.).

4. Yuanlong L., Zongli L. *Stability and performance of control systems with actuator saturation*. Birkhäuser, 2018; 365. DOI: 10.1007/978-3-319-64246-8

5. Wang J., Ricardo A.R.M., Jorge de J.L.S. Introducing system identification strategy into model predictive control. *Journal of Systems Science and Complexity*. 2020; 33(5):1402-1421. DOI: 10.1007/s11424-020-9058-3

6. Voskoboynikov Yu.E., Boeva V.A. Non-parametric identification algorithms for complex engineering systems. *Scientific Bulletin of NSTU*. 2020; 4(80):47-64. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-47-64 (rus.).

7. Voskoboynikov Yu.E., Boeva V.A. Researches of efficiency of using smoothing cubic splines on non-parametric identification problems. *Automatics & software enginery*. 2019; 4 (30):56-64. (rus.).

8. Voskoboynikov Yu.E., Boeva V.A. Stable algorithm of nonparametric identification in case of anomalous measurements. *Computational technologies*. 2020; 25(3):46-53. DOI: 10.25743/ICT.2020.25.3.006 (rus.).

9. Voskoboynikov Yu.E., Boeva V.A. Synthesis of smoothing cubic spline in non-parametric identification technical systems' algorithm. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing, 2020; 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/953/1/012035

10. Mansurov R.Sh. Experimental study of transitional process in indoor climate assurance systems. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 10:383-389. (rus.).

11. Zandareva A.Ch., Mansurov R.Sh., Rafalskaya T.A. et al. Determining the effective drop size when modeling heat and moisture exchange in the spray chamber. *Journal of Physics: Conference Series.* IOP Publishing, 2019; 012081. DOI: 10.1088/1742-6596/1382/1/012081

12. Sidorov D.N. *Analysis methods of integral dynamic models: theory and application*. Irkutsk, ISU Publ., 2013; 293. (rus.).

13. Neto F.D.M., Da Silva Neto A.J. *An introduction to inverse problems with applications*. Berlin, Springer, 2013; 427.

14. Greblicki W., Pawiak M. *Nonparametric system identification*. Cambridge, Cambridge University Press, 2008; 400.

15. Pillonetto G., De Nicolao G. New trends in nonparametric linear system identification. *Modelling Methodology for Phisiology and Medicine. 2nd ed.* ; E. Carson and C Cobelli (ed.), Elsevier, 2014; 111-129. DOI: 10.1016/B978-0-12-411557-6.00006-9

16. Gabbasov N.S. On numerical solution of one class of integro-differential equations in a special case. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2020; 60:1666-1678. DOI: 10/1134/S0965542520090092

17. Lomov A.A., Fedoseev A.V. Comparison of parameter identification methods for linear dynamic systems under mixed noise. *Journal of Mathematical Sciences*. 2021; 253:407-418. DOI: 10.1007/s10958-021-05238-0

18. Nikulin E.A. *Bases of automation control theory. Frequency methods of system analysis and synthesis*. Saint-Petersburg, BVH-Petersburg Publ., 2004; 640. (rus.).

19. Gürbüz B.A. A numerical scheme for the solution of neutral integro-differential equations including variable delay. *Mathematical Sciences*. 2021. DOI: 10.1007/s40096-021-00388-3

20. Tihonov A.N., Arsenin V.Ya. Methods of ill-posed problems solution. Moscow, Science Publ., 1986; 285. (rus.).

21. Yagola A.G., Stepanova I.E., Titarenko V.N. *Methods to solve inverse problems. Geophysics Application*. Binom, Science laboratory Publ., 2014; 216. (rus.).

22. Hadamard J. *Le probleme de Cauchy et les eguations aux derives particlee lineaires hyperbolique*. Paris, Hermann, 1932. (fr.).

23. Protasov V.Yu. *Sine function and fractal : theory of signal processing and wavelet theory*. Moscow, MNCMO Publ., 2020; 120. (rus.).

24. Ahn S., Choi U.J., Ramn A.G. A scheme for stable numerical differentiation. *Journal of Computational Applied Mathematics*. 2006; 186(2):325-334. DOI: 10.1016/j.cam.2005.02.002

25. Choi W.Y. A new method for stable numerical differentiation. *Current Applied Physics*. 2009; 9(6):1463-1466. DOI: 10.1016/j.cap.2009.03.021

26. Zabczyk J. *Mathematical control theory : an introduction*. Birkhäuser, 2020; 336. DOI: 10/1007/978-3-030-44778-6

27. Spiridonov A.V., Time I.V. Application of smoothing splines for filtration of highly noise-contaminated signals. *Automation and Remote Control*. 1998; 7:75-82. (rus.).

28. Lam Quoc Anh, Tran Quoc Duy, Le Dung Muu, Truong Van Tri. The Tikhonov regularization for vector equilibrium problems. *Computational Optimization and Applications*. 2021; 78:769-792. DOI: 10.1007/s10589-020-00268-z

29. Zav'jalov Ju.S., Kvasov B.I., Miroshnichenko V.L. *Methods of splines*. Moscow, Science Publ., 1980; 345. (rus.).

30. Wahba G. Smoothing noisy data with spline functions system. *Numerische Mathematik*. 1975; 24(2):383-393. DOI: 10.1007/bf01437407

31. Wang Y. *Smoothing spline methods and applications.* Chapman and Hall/CRC, 2011; 384.

32. Zhang H. A robust spline filter algorithm based on m-estimate theory. *Advanced Materials Research*. 2013; 655-657:909-912. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.655-657.909

33. Toshniwal D., DiPasquale M. Counting the dimension of splines of mixed smoothness. *Advances in Computational Mathematics*. 2021; 47(1). DOI: 10.1007/s10444-020-09830-x

34. Zadorozhnyj A.G., Kiselyov D.S. *Splines formulation with OpenGL*. Novosibirsk, NSTU Publ, 2019; 88. (rus.).

35. Liang Li, Kun Li, Ting-Zhu Huang, Lanteri S. Non-intrusive reduced-order modeling of parameterized electromagnetic scattering problems using cubic spline interpolation. *Journal of Scientific Computing*. 2021; 87(2). DOI: 10.1007/s10915-021-01467-2

36. Lee T.C.M. Smoothing parameter selection for smoothing splines: a simulation study. *Computational Statistics & Data Analysis*. 2006; 42(1-2):139-148. DOI: 10.1016/S0167-9473(02)00159-7

37. Balk P.I., Dolgal' A.S. Spline smoothing for experimental data under zero median of the noise. *Automation and Remote Control*. 2017; 6(78):138-156. (rus.). DOI: 10.1134/S000511791706008X

38. Yang L., Hong Y. Adaptive penalized splines for data smoothing. *Computational Statistics & Data Analysis*. 2017; 108:70-83. DOI: 10.1016/j.csda.2016.10.022

39. Voytishek A.V. Classification and applications of randomized functional numerical algorithms for the solution of second-kind fredholm integral equations. *Journal of Mathematical Sciences*. 2021; 254(5):589-605. DOI: 10.1007/s10958-021-05328-z

40. Crambes C., Kneip A., Sarda P. Smoothing splines estimators for functional linear regression. *The Annals of Statistics*. 2009; 37(1):35-72. DOI : 10.1214/07-AOS563

Received April 9, 2021.
Adopted in revised form on June 10, 2021.
Approved for publication on June 16, 2021.

Bionotes: **Rustam Sh. Mansurov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (NSUACE (Sibstrin))**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; ID RISC: 377487; rmansurov@inbox.ru;

Yuri E. Voskoboinikov — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mathematics; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (NSUACE (Sibstrin))**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; ID RISC: 13547; voscob@mail.ru;

Vasilisa A. Boeva — Graduate Student, Assistant at the Department of Applied Mathematics; **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (NSUACE (Sibstrin))**; 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; ID RISC: 1027172; v.boyeva@sibstrin.ru.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кувшинов Ю.Я., Мансуров Р.Ш.* Интеллектуализация управления системами формирования микроклимата помещений // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2012. № 2–2 (46). С. 85–93.

2. *Мансуров Р.Ш., Рудяк В.Я.* Переходные процессы в системе нагреватель–вентилятор при изменении режима работы вентилятора // Известия вузов. Строительство. 2019. № 3. С. 50–63. DOI: 10.32683/0536-1052-2019-723-3-50-63

3. *Каменский С.В., Французова Г.А., Чикильдин Г.П., Жмудь В.А., Востриков А.С., Воскобойников Ю.Е. и др.* Системы автоматического управления, мехатроники и робототехники : монография. Новосибирск : Изд-во Новосибирского гос. технического ун-та, 2017. 210 с.

4. *Yuanlong L., Zongli L.* Stability and performance of control systems with actuator saturation. Birkhäuser, 2018. 365 p. DOI : 10.1007/978-3-319-64246-8

5. Wang J., Ricardo A.R.M., Jorge de J.L.S. Introducing system identification strategy into model predictive control // Journal of Systems Science and Complexity. 2020. Vol. 33. No. 5. Pp. 1402–1421. DOI : 10.1007/s11424-020-9058-3

6. *Воскобойников Ю.Е., Боева В.А.* Алгоритмы непараметрической идентификации сложных технических систем // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. № 4 (80). С. 47–64. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-47-64

7. *Воскобойников Ю.Е., Боева В.А.* Исследования эффективности использования сглаживающих кубических сплайнов в задачах непараметрической идентификации // Автоматика и программная инженерия. 2019. № 4 (30). С. 56–64.

8. *Воскобойников Ю.Е., Боева В.А.* Устойчивый алгоритм непараметрической идентификации при наличии аномальных измерений // Вычислитель-

ные технологии. 2020. Т. 25. № 3. С. 46–53. DOI: 10.25743/ICT.2020.25.3.006

9. *Voskoboynikov Yu.E., Boeva V.A.* Synthesis of smoothing cubic spline in non-parametric identification technical systems' algorithm // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/953/1/012035

10. *Мансуров Р.Ш.* Экспериментальное исследование переходных процессов в системах обеспечения микроклимата // Вестник МГСУ [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2011. № 10. С. 383–389. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17648347

11. *Zandareva A.Ch., Mansurov R.Sh., Rafalskaya T.A., Fedorova N.N.* Determining the effective drop size when modeling heat and moisture exchange in the spray chamber // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019. P. 012081. DOI: 10.1088/1742-6596/1382/1/012081

12. *Сидоров Д.Н.* Методы анализа интегральных динамических моделей: теория и приложения : монография. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2013. 293 с.

13. *Neto F.D.M., Da Silva Neto A.J.* An introduction to inverse problems with applications. Berlin : Springer, 2013. 427 p.

14. *Greblicki W., Pawiak M.* Nonparametric system identification. Cambridge : Cambridge University Press, 2008. 400 p.

15. *Pillonetto G., De Nicolao G.* New trends in nonparametric linear system identification // Modelling Methodology for Physiology and Medicine. Elsevier, 2014. Pp. 111–129. DOI: 10.1016/B978-0-12-411557-6.00006-9

16. *Gabbasov N.S.* On numerical solution of one class of integro-differential equations in a special case // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2020. No. 60. Pp. 1666–1678. DOI: 10/1134/S0965542520090092

17. *Lomov A.A., Fedoseev A.V.* Comparison of parameter identification methods for linear dynamic systems under mixed noise // Journal of Mathematical Sciences. 2021. No. 253. Pp. 407-418. DOI : 10.1007/s10958-021-05238-0

18. *Никулин Е.А.* Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем. СПб. : Изд-во БХВ-Петербург, 2004. 601 с.

19. *Gürbüz B.A.* A numerical scheme for the solution of neutral integro-differential equations including variable delay // Mathematical Sciences. 2021. DOI: 10.1007/s40096-021-00388-3

20. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М. : Наука, 1986. 285 с.

21. *Ягола А.Г., Янфей Ван, Степанова И.Э., Титаренко В.Н.* Обратные задачи и методы их решения. Приложения к геофизике. М. : Бином ; Лаборатория знаний, 2014. 216 с.

22. *Hadamard J.* Le probleme de Cauchy et les eguations aux derives particlee lineaires hyperbolique. Paris : Hermann, 1932.

23. *Protasov V.Yu.* Синусоида и фрактал: Элементы теории обработки сигналов и теории всплесков. М. : МЦНМО, 2020. 120 с.

24. *Ahn S., Choi U.J., Ramn A.G.* A scheme for stable numerical differentiation // Journal of Computational Applied Mathematics. 2006. Vol. 186. Issue 2. Pp. 325–334. DOI: 10.1016/j.cam.2005.02.002

25. *Choi W.Y.* A new method for stable numerical differentiation // Current Applied Physics. 2009. Vol. 9. Issue 6. Pp. 1463–1466. DOI: 10.1016/j.cap.2009.03.021

26. *Zabczyk J.* Mathematical control theory : an Introduction. 2020. Birkhäuser. 336 p. DOI : 10/1007/978-3-030-44778-6

27. *Спиридонов А.В., Тиме И.В.* Применение сглаживающих сплайнов для фильтрации сильно зашумленных сигналов // Автоматика и телемеханика. 1998. № 7. С. 75–82.

28. *Lam Quoc Anh, Tran Quoc Duy, Le Dung Muu, Truong Van Tri.* The Tikhonov regularization for vector equilibrium problems // Computational Optimization and Applications. 2021. No. 78. Pp. 769–792. DOI: 10.1007/s10589-020-00268-z

29. *Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л.* Методы сплайн-функций. М. : Наука, 1980. 345 с.

30. *Wahba G.* Smoothing noisy data with spline functions system // Numerische Mathematik. 1975. Issue 24 (2). Pp. 383–393. DOI: 10.1007/bf01437407

31. *Wang Y.* Smoothing Spline Methods and Applications. Chapman and Hall/CRC, 2011. 384 p.

32. *Zhang H.* A robust spline filter algorithm based on m-estimate theory // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 655–657. Pp. 909–912. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.655-657.909

33. *Toshniwal D., DiPasquale M.* Counting the dimension of splines of mixed smoothness // Advances in Computational Mathematics. 2021. Vol. 47. Issue 1. DOI: 10.1007/s10444-020-09830-x

34. *Задорожный А.Г., Киселев Д.С.* Построение сплайнов с использованием библиотеки OpenGL. Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2019. 88 с.

35. *Liang Li, Kun Li, Ting-Zhu Huang, Lanteri S.* Non-intrusive reduced-order modeling of parameterized electromagnetic scattering problems using cubic spline interpolation // Journal of Scientific Computing. 2021. Vol. 87(2). DOI: 10.1007/s10915-021-01467-2

36. *Lee T.C.M.* Smoothing parameter selection for smoothing splines: a simulation study // Computational Statistics & Data Analysis. 2006. Vol. 42. Issue 1–2. Pp. 139-148. DOI: 10.1016/S0167-9473(02)00159-7

37. *Балка П.И., Долгаль А.С.* Сплайн-сглаживание экспериментальных данных при нулевом медианном значении помех // Автоматика и телеме-

ханика. 2017. Vol. 6 (78). Pp. 138–156. DOI: 10.1134/S000511791706008X

38. *Yang L., Hong Y.* Adaptive penalized splines for data smoothing // Computational Statistics & Data Analysis. 2017. Vol. 108. Pp. 70–83. DOI: 10.1016/j.csda.2016.10.022

39. *Voytishek A.V.* Classification and applications of randomized functional numerical algorithms for the solution of second-kind fredholm integral equations // Journal of Mathematical Sciences. 2021. Vol. 254. Issue 5. Pp. 589–605. DOI: 10.1007/s10958-021-05328-z

40. *Crambes C., Kneip A., Sarda P.* Smoothing splines estimators for functional linear regression // The Annals of Statistics. 2009. Vol. 37 (1). Pp. 35–72. DOI: 10.1214/07-AOS563

Поступила в редакцию 9 апреля 2021 г.
Принята в доработанном виде 10 июня 2021 г.
Одобрена для публикации 16 июня 2021 г.

Об авторах: **Рустам Шамильевич Мансуров** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции; **Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин) (НГАСУ (Сибстрин))**; 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113; РИНЦ ID: 377487; rmansurov@inbox.ru;

Юрий Евгеньевич Воскобойников — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики; **Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин) (НГАСУ (Сибстрин))**; 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113; РИНЦ ID: 13547; voscob@mail.ru;

Василиса Андреевна Боева — аспирант, ассистент кафедры прикладной математики; **Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин) (НГАСУ (Сибстрин))**; 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113; РИНЦ ID: 1027172; v.boyeva@sibstrin.ru.

УДК 658.5:69 DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.730-740

Оценка качества проектной документации повторного использования

В.А. Алиулова, М.В. Петроченко
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В рамках создания института типового проектирования планируется создание библиотеки информационных моделей многократного использования для объектов капитального строительства (ОКС) различного функционального назначения. От качества этих моделей зависит качество проектной документации, которое влияет на качество объекта строительства. Когда речь идет о типовом проектировании, то вопрос введения системы оценки становится еще более актуальным, так как от качества одного проекта будет зависеть множество построенных по данному проекту объектов. Критерии признания документации экономически эффективной проектной документацией повторного использования на сегодняшний день являются достаточно субъективными и требуют введения качественных и количественных показателей оценки. Цель исследования — создание методики комплексной оценки качества проектной документации и признание ее экономически эффективной проектной документацией повторного использования. Для достижения цели выдвигаются следующие задачи: определить необходимость преобразования и формализации требований к оценке экономической эффективности проектной документации; связь между качеством и экономической эффективностью проектной документации; предложить критерии оценки качества проектной документации.

Материалы и методы. Оценка качества проектной документации проводится путем выявления комплексного показателя качества разработанной документации на основе предложенных критериев и их весовых коэффициентов. Весовые коэффициенты определяются методом экспертных оценок.

Результаты. На примере ОКС (школа) представлены критерии оценки качества проектной документации путем рассмотрения трех групп показателей качества. Методом экспертных оценок установлены весовые коэффициенты всех критериев и предложена методика определения качества проектной документации путем вычисления показателя качества, по значению которого рассчитывается возможность включения документации в реестр типовой проектной документации.

Выводы. Подтверждена необходимость преобразования и формализации требований к оценке экономической эффективности проектной документации. Доказано, что введение многокритериальной методики отбора проектной документации позволит сделать оценку качества проектной документации комплексной и более объективной.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: проектная документация повторного использования, экономически эффективная проектная документация, типовое проектирование, реестр типовой проектной документации, качество проектных решений, контроль качества, экспертиза

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Алиулова В.А., Петроченко М.В.* Оценка качества проектной документации повторного использования // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 6. С. 730–740. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.730-740

The quality assessment of reusable project documentation

Vladislava A. Aliulova, Marina V. Petrochenko
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A library of reusable information models of capital construction facilities (CCF), having different functional profiles, is to be established within the framework of the future institute of standardized design. The quality of these models determines the quality of the project documentation, which influences the quality of construction facilities. When the focus is placed on standardized design, the introduction of an assessment system turns all the more relevant, since the quality of one project will pre-determine the quality of numerous construction facilities built from one single design. Presently, the criteria, that determine the economically efficient reusability of the project documentation, are rather biased, and they need qualitative and quantitative assessment parameters. The purpose of this research is to develop a methodology for the comprehensive quality assessment of the project documentation and its approval as the documentation designated for economically efficient reuse. The attainment of this purpose requires the accomplishment of the following objectives:

© В.А. Алиулова, М.В. Петроченко, 2021
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

transformation and formalization of the requirements applicable to the assessment of the economic efficiency of the project documentation; identification of the relationship between the quality and economic efficiency of the project documentation; issuance of draft quality assessment criteria.

Materials and methods. The quality of the project documentation is assessed with the help of an integrated quality indicator, based on a set of criteria and their weight coefficients. The expert evaluation method is used to identify the weight coefficients.

Results. The case of a capital construction facility (a school building) was used to present the quality assessment criteria applicable to the project documentation. Three groups of quality indicators were considered. The expert evaluation method was applied to identify the weight coefficients for each criterion, and the quality assessment methodology was proposed. The methodology entails the calculation of a quality indicator, whose value serves as the basis for a decision to enter the project into the register of standardized projects.

Conclusions. The co-authors have confirmed the need to transform and formalize the requirements applied to the assessment of the economic efficiency of the project documentation. They have proven that the multi-criterial project selection procedure will make the process of the project documentation quality assessment multilateral and less biased.

KEYWORDS: reusable project documentation, economically efficient project documentation, standardized design, register of standardized project documentation packages, quality of project solutions, quality control, expert evaluation

FOR CITATION: Aliulova V.A., Petrochenko M.V. The quality assessment of reusable project documentation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(6):730-740. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.730-740 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В рамках Стратегии развития строительной отрасли до 2030 года предусматривается цифровизация отрасли, неотъемлемым компонентом которой должны стать электронные базы информационных моделей многократного использования для объектов капитального строительства (ОКС) различного функционального назначения. Введение практики отбора проектов для повторного применения показало актуальность и важность наличия таких проектов для строительства зданий и сооружений, главным образом тех, которые финансируются за счет или с привлечением средств федерального бюджета, бюджетов субъектов Российской Федерации и (или) местных бюджетов, в связи с чем особое внимание уделяется экономической эффективности проектной документации.

От качества этих информационных моделей зависит качество проектной документации, имеющее ключевое влияние на качество объекта строительства. Для поддержания высокого темпа качественного проектирования при больших объемах работ и повышения экономической эффективности данного процесса требуется внедрение системы оценки качества проектных решений, которая будет учитывать не только экономическую, но и социальную составляющую.

Качество продукции инвестиционно-строительного комплекса (ИСК) формируется на всех этапах ее жизненного цикла (ЖЦ): при проектировании объектов, изготовлении материалов, изделий, деталей и конструкций, производстве строительно-монтажных работ, эксплуатации зданий и сооружений. Результат деятельности ИСК зависит от каждого этапа, но именно проектная работа является первым этапом в данной цепочке, поэтому качество проектной документации влияет на качество конечного продукта — объекта строительства [1, 2–4].

Под качеством проектной документации следует понимать степень соответствия состава, содержания, объемов и формы представления проектных документов требованиям действующих нормативов, с учетом факторов наличия ошибок и уровня графического отображения подлинников и копий документов [2–4]. Качественной может считаться такая документация, комплектность, объем и содержание которой необходимы и достаточны для эффективного выполнения работ по строительству, эксплуатации и обеспечению последующих стадий ЖЦ проектируемого объекта.

Согласно данным статистики практически вся документация, получившая положительные заключения, доработана в процессе проведения государственной экспертизы с целью приведения ее в соответствие с требованиями действующих нормативных правовых актов и технических регламентов [5–9]. Анализ выданных заключений показывает, что при проведении государственной экспертизы в каждом четвертом комплекте документации выявлены существенные нарушения в части обеспечения конструктивной надежности и безопасности ОКС.

Иными словами, налицо высокий процент ошибок в разработке проектных решений, реализация которых могла бы привести к техногенным авариям, наносящим ущерб окружающей среде и материальной инфраструктуре и становящимся причиной гибели и страданий людей [10].

Кроме того, практика показывает, что в представляемой на повторную экспертизу проектной документации устраняются не все замечания экспертов, что, по существу, является наглядным подтверждением недостаточной квалификации проектировщиков и отсутствия должного контроля со стороны генеральной проектной организации и технического заказчика.

На сегодняшний день необходимо ввести систему оценки проектных работ не только с точки зрения обеспечения качественных параметров объекта, но и качества проектирования, с точки зрения наличия ошибок и недоработок, требующих корректировки проектно-сметной документации как на стадии экспертизы, так и на стадии строительства [11–13].

Если говорить о признании документации экономически эффективной документацией повторного использования, то для нее введение этой системы

особенно важно, поскольку от разработанного типового проекта будет зависеть качество множества построенных по данному проекту объектов.

С 2016 г. введен механизм признания проектной документации экономически эффективной проектной документацией повторного использования, систематизированные сведения о которой представлены в реестре такой документации на сайте Минстроя России. Критерии признания документации экономически эффективной приведены в Постановлении Правительства РФ от 12.11.2016 № 1159 «О критериях экономической эффективности проектной документации». Простыми словами, экономически эффективными признаются проекты, в которых предусмотрены технические решения, наиболее выигрышные в части энергоэффективности по функциональным, техническим и экономическим показателям, позволяющие рационально использовать капитальные вложения, широко применять прогрессивные методы строительства [14, 15].

В связи с цифровизацией строительной отрасли в 2018 г. была создана и введена в эксплуатацию государственная информационная система Единый государственный реестр заключений экспертизы проектной документации объектов капитального строительства. Это повлекло за собой ужесточение требований как к составу, содержанию и порядку оформления заключений государственной экспертизы, так и к подготовке и форме подачи проектной документации. Данные мероприятия направлены на повышение качества проектных решений. Таким образом, актуальность введения системы контроля качества проектной документации становится еще более очевидной [16].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Алгоритм отбора и применения типовых проектов на сегодня не отработан. По сути, в настоящее время типовой проектной документации как таковой, т.е. разработанной на основе унификации, типизации и для массового применения, не существует. Имеется авторская проектная документация, которой могут пользоваться сторонние организации в случае, если она получила положительную оценку государственной или негосударственной экспертизы и при заключении договора с правообладателем.

Появляется ряд проблем с проектной документацией повторного использования:

- отсутствие установленных требований к составу разделов и содержанию типового проекта;
- отсутствие порядка привязки типового проекта и проекта повторного применения;
- не четко прописанная процедура экспертизы типового проекта, проекта повторного применения, модифицированной проектной документации;
- отсутствие порядка хранения, актуализации и приобретения проектной документации повторного использования, отсутствуют установленные показатели стоимости приобретения и привязки типовой проектной документации, включенной в федеральный реестр;
- вопросы авторских прав на данную документацию;
- вопросы с соблюдением законодательства о конкурсных процедурах при выборе государственным заказчиком проекта из реестра и его привязки.

Однако основной проблемой, возникающей еще до применения такой документации, является отсутствие механизма признания документации экономически эффективной документацией повторного использования и оценки ее качества [17, 18].

Критерии экономической эффективности, приведенные в Постановлении Правительства РФ № 1159, — достаточно субъективны и не имеют качественных и количественных характеристик. При наличии методических документов, прямо или косвенно затрагивающих вопросы выбора проектов для реализации, среди них нет рекомендаций, позволяющих комплексно подойти к такому выбору с учетом сравнительного анализа их проектных решений и экономической эффективности.

Необходимо разработать многокритериальную модель отбора проектов для признания документации экономически эффективной проектной документацией повторного использования путем оценки ее качества. Проводить оценку предлагается методами экспертных оценок. Эти методы являются частью обширной области теории принятия решений, а само экспертное оценивание — процедура получения оценки проблемы на основе мнения специалистов (экспертов) с целью последующего принятия решения (выбора) [19, 20].

Существуют различные методы экспертных оценок:

1. Метод ранжирования — это расположение объектов в порядке возрастания или убывания какого-либо присущего им свойства. Ранжирование позволяет выбрать из исследуемой совокупности факторов наиболее существенный. Неудобен при большом количестве параметров.

2. Метод парных сравнений — установление предпочтения объектов при сравнении всех возможных пар. Здесь не нужно, как при ранжировании, упорядочивать все объекты, необходимо в каждой из пар выявить более значимый объект или установить их равенство. Недостаток заключается в необходимости выполнения большого количества парных сравнений.

3. Метод последовательных сравнений — упорядочивание экспертом всех признаков в порядке уменьшения их значимости. Затем первому признаку присваивается значение единицы, а остальным назначаются коэффициенты в долях единицы. Далее эксперт сравнивает первый признак с суммой всех последующих.

4. Метод приписывания баллов — выставление баллов каждому фактору по определенной шкале

с целью не только их ранжирования, но и определения того, насколько один фактор является более или менее весомым, чем другой.

При работе с большим количеством параметров наиболее оптимален метод приписывания баллов. Каждый эксперт оценивает важность определенного критерия и выставляет ему оценку по утвержденной шкале. Одну и ту же оценку можно назначить нескольким параметрам. Метод был выбран для назначения весовых коэффициентов критериям внутри каждой группы показателей качества.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера рассматривается проектная документация на строительство школы. Для оценки качества проекта выделены три группы показателей качества:

- экономические;
- эксплуатационные;
- социальные.

Эти группы располагаются в порядке ранжирования и имеют различные весовые коэффициенты, которые устанавливают степень влияния показателей качества на качество всей документации.

Внутри каждой группы есть ряд критериев, которые будут оцениваться экспертами. Данные критерии также имеют различные весовые показатели, определенные методом экспертных оценок.

Показатель качества разработанной проектной документации Q вычисляется по формуле:

$$Q = \sqrt{\sum_{i=1}^{p} K_i A_i^2}, \; i = 1, 2, \ldots, \; p, \qquad (1)$$

где A_i — экспертная оценка в баллах по совокупности показателей качества i ($0 \le A \le 5$); p — количество групп, включающих в себя критерии качества; K_i — весовой коэффициент, определяющий степень влияния показателя качества на качество всей документации, значение рассчитывается методом ранжирования.

Экспертная оценка A_i каждой группы показателей выявляется по формуле:

$$A_i = \sqrt{\sum_{n=1}^{m} k_{in} a_{in}^2}, \; n = 1, 2, \ldots, m, \qquad (2)$$

где a_{in} — экспертная оценка в баллах в группе показателей i по критерию n ($0 \le A \le 5$); m — количество критериев качества в группе показателей i; k_{in} — весовой коэффициент, определяющий степень влияния критерия качества n на экспертную оценку группы показателей i, значение выясняется методом приписывания баллов.

Определенные методом ранжирования коэффициенты K_i принимают следующие значения:

1. Экономические показатели — $K_1 = 0{,}5$.
2. Эксплуатационные показатели — $K_2 = 0{,}3$.
3. Социальные показатели — $K_3 = 0{,}2$.

Для установления весовых коэффициентов k_{in} критериев в каждой группе показателей была составлена анкета. В ходе анкетирования выставлены оценки каждому критерию в зависимости от того, насколько большое влияние оказывает этот критерий на качество проекта. По каждому критерию появилась средняя оценка, которая в дальнейшем переведена в весовой коэффициент. Эти весовые коэффициенты будут умножаться на экспертные оценки в другой анкете при определении возможности или невозможности включения проектной документации в реестр типовой проектной документации.

Внутри каждой группы показателей качества рассматриваются критерии:

1. Экономические показатели:
   - стоимость строительства;
   - стоимость проектных работ;
   - стоимость эксплуатации;
   - продолжительность строительства;
   - трудозатраты при строительстве;
   - материалоемкость строительства.
2. Эксплуатационные показатели:
   - расчетный срок эксплуатации здания;
   - площадь, приходящаяся на одного учащегося;
   - энергоэффективность здания;
   - конфигурация здания, которая позволяет быстро и безопасно его покинуть;
   - применяемые в проекте материалы.
3. Социальные показатели:
   - создание новых учебных мест;
   - создание новых рабочих мест;
   - организация «доступной среды» для всех категорий граждан;
   - благоустройство прилегающей территории;
   - эргономика пространства.

Необходимо отметить, что для другого типа ОКС критерии внутри группы социальных показателей будут отличаться.

Для определения весового коэффициента каждого критерия составляется таблица экспертных оценок (табл. 1).

Весовой коэффициент вычисляется с помощью формулы:

$$f_{rs} = \frac{c_{rs}}{\sum_{s=1}^{t} c_{rs}}, \; r = 1, 2, \ldots, \; v, \; s = 1, 2, \ldots, t_r, \qquad (3)$$

где f_{rs} — вес s-критерия, определенный r-экспертом; c_{rs} — оценка r-эксперта, выставленная s-критерию; t — количество критериев в группе показателей качества; $\sum_{s=1}^{t} c_{rs}$ — сумма оценок для строки r.

Итоговые весовые коэффициенты критериев внутри каждой группы рассчитываются по выражению:

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6. 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6. 2021

Табл. 1. Таблица экспертных оценок

Table 1. Table of expert evaluations

Эксперты Experts	Оценки критериев Evaluations of criteria						Сумма Sum
	1	2	…	*s*	…	*t*	
1	c_{11}	c_{12}	…	c_{1s}	…	c_{1t}	$\sum_{s=1}^{t} c_{1s}$
2	c_{21}	c_{22}	…	c_{2s}	…	c_{2t}	$\sum_{s=1}^{t} c_{2s}$
…	…	…	…	…	…	…	…
r	c_{r1}	c_{r2}	…	c_{rs}	…	c_{rt}	$\sum_{s=1}^{t} c_{rs}$

$$k_s = \frac{\sum_{r=1}^{v} f_{rs}}{\sum_{s=1}^{t}\sum_{r=1}^{v} f_{rs}}, \quad (4)$$

где k_s — весовой коэффициент для *s*-показателя.

Сумма весовых коэффициентов должна равняться единице:

$$\sum_{s=1}^{t} k_s = 1.$$

В процессе анкетирования были составлены таблицы (табл. 2) по каждой группе показателей качества с указанием весов критериев по результатам оценок всех экспертов. В каждой таблице определены суммы критериев в пределах одной группы и вычислены их весовые коэффициенты.

Оцениваемые критерии качества с полученными в ходе анкетирования весовыми коэффициентами приведены в табл. 3.

Экспертами для оценки проектных решений выбраны главные инженеры проекта (ГИП), которые состоят в Национальном реестре специалистов НОПРИЗ. Согласно профессиональному стандарту «Организатор проектного производства в строительстве» ГИП имеет седьмой уровень квалификации, владеет методиками по контролю технического уровня принимаемых проектных и архитектурно-планировочных решений, умеет

Табл. 2. Весовые коэффициенты, определенные методом приписывания баллов

Table 2. Weight coefficients determined by the scoring method

Эксперты Experts	Критерии Criteria						Сумма Sum
	1	2	…	*s*	…	*t*	
1	f_{11}	f_{12}	…	f_{1s}	…	f_{1t}	$\sum_{s=1}^{t} f_{1s}$
2	f_{21}	f_{22}	…	f_{2s}	…	f_{2t}	$\sum_{s=1}^{t} f_{2s}$
…	…	…	…	…	…	…	…
r	f_{r1}	f_{r2}	…	f_{rs}	…	f_{rt}	$\sum_{s=1}^{t} f_{rs}$
…	…	…	…	…	…	…	…
v	f_{v1}	f_{v2}	…	f_{vs}	…	f_{vt}	$\sum_{s=1}^{t} f_{vs}$
Сумма критериев Sum of criteria	$\sum_{r=1}^{v} f_{r1}$	$\sum_{r=1}^{v} f_{r2}$	…	$\sum_{r=1}^{v} f_{rs}$	…	$\sum_{r=1}^{v} f_{rt}$	$\sum_{s=1}^{t}\sum_{r=1}^{v} f_{rs}$
Весовой коэффициент Weight coefficient	k_1	k_2	…	k_s	…	k_t	$\sum_{s=1}^{t} k_s = 1$

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 16. Выпуск 6, 2021**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 16. Issue 6, 2021**

Табл. 3. Критерии качества проектной документации

Table 3. The quality criteria applied to the project documentation

Критерий качества Quality criterion	Оценка эксперта Expert evaluation	Весовой коэффициент Weight coefficient	Экспертная оценка группы показателей Expert evaluation of a group of indicators
Экономические показатели / Economic indicators			
Стоимость строительства Cost of construction	a_{11}	$k_{11} = 0{,}19$	$A_1 = \sum_{n=1}^{m} a_{1n} k_{1n}$
Стоимость проектных работ Cost of design	a_{12}	$k_{12} = 0{,}15$	
Стоимость эксплуатации Cost of operation	a_{13}	$k_{13} = 0{,}15$	
Продолжительность строительства Construction period	a_{14}	$k_{14} = 0{,}19$	
Трудозатраты при строительстве Labour cost of construction	a_{15}	$k_{15} = 0{,}16$	
Материалоемкость строительства Materials consumption in the course of construction	a_{16}	$k_{16} = 0{,}16$	
Эксплуатационные показатели / Performance criteria			
Расчетный срок эксплуатации здания Estimated useful life of a building	a_{21}	$k_{21} = 0{,}21$	$A_2 = \sum_{n=1}^{m} a_{2n} k_{2n}$
Площадь, приходящаяся на одного учащегося Area per student	a_{22}	$k_{22} = 0{,}13$	
Энергоэффективность здания Energy efficiency of a building	a_{23}	$k_{23} = 0{,}17$	
Конфигурация здания, которая позволяет быстро и безопасно его покинуть Building design that enables fast and safe evacuation	a_{24}	$k_{24} = 0{,}24$	
Применяемые в проекте материалы Project materials	a_{25}	$k_{25} = 0{,}25$	
Социальные показатели / Social indicators			
Создание новых учебных мест (численность учащихся) Creation of new places to study (the number of students)	a_{31}	$k_{31} = 0{,}26$	$A_3 = \sum_{n=1}^{m} a_{3n} k_{3n}$
Создание новых рабочих мест (численность сотрудников) Creation of new jobs (the number of employees)	a_{32}	$k_{32} = 0{,}17$	
Создание «доступной среды» для всех категорий граждан Creation of the “accessible environment” for all categories of citizens	a_{33}	$k_{33} = 0{,}19$	
Благоустройство прилегающей территории Development of the adjacent territory	a_{34}	$k_{34} = 0{,}20$	
Эргономика пространства (возможность трансформации классов, цветовые решения, освещенность, уровень шума) Spatial ergonomics (convertibility of classrooms, colour solutions, lighting, noise level)	a_{35}	$k_{35} = 0{,}18$	

выполнять экономические и технические расчеты по проектным решениям, а также знает требования нормативно-правовых актов и нормативно-технических документов по проектированию и строительству ОКС различного функционального назначения.

Для выставления оценок по рассматриваемому проекту экспертам будет необходимо ответить на вопросы анкеты (табл. 4).

Оценки, полученные из данной анкеты, умножаются на весовые коэффициенты, приведенные в табл. 3. Таким образом вычисляется экспертная

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

Табл. 4. Анкета эксперта для определения качества проектной документации и возможности ее включения в реестр типовой проектной документации

Table 4. The expert questionnaire used to determine the quality of the project documentation and the includability in the register of standardized project documentation

Показатель Indicator	Оценка по пятибалльной шкале Assessment made on a five-point scale			
	Эксперты Experts			
	1	2	…	*N*
Экономические показатели / Economic indicators				
Насколько рентабельным является проект с точки зрения стоимости строительства The cost efficiency of the construction project				
Насколько рентабельный проект с точки зрения стоимости проектных работ The cost efficiency of the project design				
Насколько рентабельный проект в плане стоимости эксплуатации The cost efficiency of the project operation				
Насколько рентабельный проект с позиции продолжительности строительства The efficiency of the term of construction				
Насколько рентабельный проект в плане трудозатрат при строительстве The efficiency of the project labour cost				
Насколько рентабельный проект в отношении материалоемкости строительства The efficiency material consumption				
Эксплуатационные показатели / Operation-related indicators				
Оцените проект с точки зрения расчетного срока эксплуатации здания Evaluate the project in terms of the estimated service life of a building				
Оцените проект с точки зрения площади, приходящейся на одного учащегося Evaluate the project in terms of the area per student				
Оцените проект с позиции энергоэффективности здания Evaluate the project in terms of the energy efficiency of a building				
Насколько конфигурация здания позволяет быстро и безопасно его покинуть Evaluate the building design in terms of safe and fast evacuation				
Оцените применяемые в проекте материалы (качество, надежность, срок службы, экологичность, современность) Evaluate the project materials in terms of their quality, reliability, service life, ecological performance, novelty)				
Социальные показатели / Social indicators				
Насколько внедрение проекта будет способствовать созданию новых учебных мест To what extent the implementation of this project will contribute to the creation of new places to study				
Насколько внедрение проекта будет способствовать созданию новых рабочих мест To what extent the implementation of this project will contribute to the creation of new jobs				
Насколько данный проект позволяет организовать «доступную среду» для всех категорий граждан To what extent this project will facilitate the arrangement of “the accessible environment” for all categories of citizens				
Оцените проект в плане благоустройства прилегающей территории Evaluate the project ability to develop the adjacent area				
Оцените проект с точки зрения эргономичности (возможность трансформации классов, цветовые решения, освещенность, уровень шума) Evaluate the project ergonomics (convertibility of classrooms, colour solutions, lighting, noise level)				

оценка в пределах группы показателей, а затем по формуле (1) определяется показатель качества проектной документации Q.

Максимально возможное значение данного показателя равно 5, минимальное — 1. Можно предложить следующие варианты принятия решения в зависимости от вычисленного значения Q. В случае, если $Q < 2{,}5$, то качество проектной документации является недостаточным для повторного использования. Если $2{,}5 \le Q < 4$, то возможна доработка проектной документации и последующая новая оценка ее качества. При $Q \ge 4$ проектная документация признается экономически эффективной проектной документацией повторного использования.

Предположим, что экспертами был рассмотрен некий проект школы и проанализирована проектная документация на ее строительство. В результате анализа выставлены оценки по каждому критерию и вычислена экспертная оценка группы показателей (табл. 5).

Табл. 5. Пример возможной экспертной оценки качества проектной документации

Table 5. A sample expert evaluation of the project documentation quality

Критерий качества Quality criterion	Оценка эксперта Expert evaluation	Весовой коэффициент Weight coefficient	Экспертная оценка группы показателей Expert evaluation of a group of indicators
Экономические показатели / Economic indicators			
Стоимость строительства Construction cost	$a_{11} = 4$	$k_{11} = 0{,}19$	$A_1 = 4{,}05$
Стоимость проектных работ Design cost	$a_{12} = 3$	$k_{12} = 0{,}15$	
Стоимость эксплуатации Operation cost	$a_{13} = 3$	$k_{13} = 0{,}15$	
Продолжительность строительства Term of construction	$a_{14} = 5$	$k_{14} = 0{,}19$	
Трудозатраты при строительстве Labour cost of construction	$a_{15} = 5$	$k_{15} = 0{,}16$	
Материалоемкость строительства Material consumption in the process of construction	$a_{16} = 4$	$k_{16} = 0{,}16$	
Эксплуатационные показатели / Operation-related indicators			
Расчетный срок эксплуатации здания Estimated useful life of a building	$a_{21} = 4$	$k_{21} = 0{,}21$	$A_2 = 4{,}06$
Площадь, приходящаяся на одного учащегося Area per student	$a_{22} = 2$	$k_{22} = 0{,}13$	
Энергоэффективность здания Energy efficiency of a building	$a_{23} = 3$	$k_{23} = 0{,}17$	
Конфигурация здания, которая позволяет быстро и безопасно его покинуть Building design that enables fast and safe evacuation	$a_{24} = 5$	$k_{24} = 0{,}24$	
Применяемые в проекте материалы Project materials	$a_{25} = 5$	$k_{25} = 0{,}25$	
Социальные показатели / Social indicators			
Создание новых учебных мест (численность учащихся) Creation of new places to study (number of students)	$a_{31} = 5$	$k_{31} = 0{,}26$	$A_3 = 4{,}13$
Создание новых рабочих мест (численность сотрудников) Creation of new jobs (number of employees)	$a_{32} = 5$	$k_{32} = 0{,}17$	
Создание «доступной среды» для всех категорий граждан Creation of the “accessible environment” for all categories of citizens	$a_{33} = 3$	$k_{33} = 0{,}19$	
Благоустройство прилегающей территории Development of the adjacent territory	$a_{34} = 3$	$k_{34} = 0{,}20$	
Эргономика пространства (возможность трансформации классов, цветовые решения, освещенность, уровень шума) Spatial ergonomics of the adjacent area (convertibility of classrooms, colour solutions, lighting, noise level)	$a_{35} = 2$	$k_{35} = 0{,}18$	

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

Таким образом, итоговый показатель качества равен:

$$Q = 4,05 \cdot 0,5 + 4,06 \cdot 0,3 + 4,13 \cdot 0,2 = 4,069.$$

Так как $Q \geq 4$, то данная документация может быть признана экономически эффективной проектной документацией повторного использования и включена в реестр типовой проектной документации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По итогам анализа процесса признания проектной документации экономически эффективной проектной документацией повторного использования можно сделать вывод о том, что на сегодняшний день он является достаточно субъективным. Для того чтобы снизить субъективность данного процесса, необходимо ввести качественные и количественные показатели экономической эффективности, которые позволят дать документации комплексную оценку.

Понятие экономической эффективности проектной документации напрямую связано с ее качеством. Предлагаемая методика отбора проектной документации позволяет путем оценки качества проекта определить экономическую эффективность документации и возможность или невозможность включения ее в реестр типовой проектной документации.

Определяемый в ходе работы показатель качества Q дает возможность объективно оценить экономическую эффективность проектной документации. В зависимости от его значения проект будет либо отклоняться ($Q < 2,5$), либо отправляться на доработку ($2,5 \leq Q < 4$), либо признаваться проектом повторного использования ($Q \geq 4$).

Отклонение проекта говорит о том, что проектная документация соответствует всем техническим регламентам и имеет положительное заключение экспертизы, но не признается экономически эффективной и не рекомендуется к включению в реестр типовой проектной документации.

При отправлении проекта на корректировку, в зависимости от того, затрагивают внесенные изменения конструктивные и иные характеристики безопасности объекта или нет, принимается решение о повторном прохождении экспертизы или о получении заключения о модификации проектной документации соответственно с дальнейшей повторной оценкой качества.

Применение предложенных выше критериев оценки качества проектных работ позволяет формализовать требования к их качеству в части степени проработки проекта, исключения недоработок и коллизий, повышения безопасности объекта строительства, реализации проекта в запланированные сроки и с рассчитанной стоимостью строительства. Подход к оценке качества становится более объективным и комплексным.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аксенова Е.А., Ординян В.С.* Повышение качества проектной документации при внедрении технологии информационного моделирования и методологии планирования PMBOK // Фундаментальные и прикладные исследования в науке и образовании : сб. ст. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2019. С. 124–129.

2. *Голубова О.С.* Показатели оценки качества проектно-сметной документации в строительстве // Актуальные вопросы экономики строительства и городского хозяйства : докл. Междунар. науч.-практ. конф. Минск : БНТУ, 2015. С. 55–65.

3. *Киселева К.И.* Система контроля качества проектной документации как составляющая часть системы менеджмента качества проектной организации // Проблемы экономики и управления строительством в условиях экологически ориентированного развития : мат. Всеросс. науч.-практ. онлайн-конф. с междунар. участием и элементами научной школы для молодежи. Иркутск, 2014. С. 188–196.

4. *Самит И.Р., Манакова И.А.* Применение средств и методов управления качеством в проектной деятельности организации // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения : сб. ст. VI Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2017. С. 171–174.

5. *Башкирова Е.А., Кожевников И.В.* Проблемы и перспективы применения экономически эффективной проектной документации в архитектурно-строительном проектировании // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство : сб. ст. Самара, 2019. С. 578–583.

6. *Дроков С.В.* Данные документированных сфер деятельности организации и их повторное использование // Вестник ВНИИДАД. 2019. № 3. С. 16–24.

7. *Кузнецова К.И.* Исследование и анализ научно-методических и нормативно-правовых основ оценки эффективности проектной документации объектов капитального строительства // ACTUAL SCIENTIFIC RESEARCH 2018 : мат. XXXVII Междунар. науч.-практ. конф. Астрахань, 2018. С. 153–156.

8. *Васильева А.А.* Особенности применения проектной документации повторного использования // Инвестиции, строительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения : мат. X Междунар. науч.-практ. конф. Томск, 2020. С. 645–648.

9. *Познахирко Т.Ю., Топчий Д.В.* Особенности внедрения BIM в процесс разработки проектной документации // Строительное производство. 2020. № 1. С. 69–72.

10. *Maleeva T., Selyutina L., Frolova N.* Use of modern technology of information modeling in capital construction object life cycle management // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. P. 044002. DOI: 10.1088/1757-899X/687/4/044002

11. *Тухватуллин Р.Р.* Методика расчета экономической эффективности внедрения методов автоматизированного проектирования типовых проектных решений // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2014. № 1. С. 54–56.

12. *Каган П.Б., Славгородская А.Н.* Экономическая эффективность применения реестра типовой проектной документации // Экономика и предпринимательство. 2014. № 9 (50). С. 818–820.

13. *Tuhacek M., Svoboda P.* Quality of project documentation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 471. P. 052012. DOI: 10.1088/1757-899X/471/5/052012

14. *Бочаров А.Ю., Сердюк М.В.* Типовой проект как эффективный инструмент оптимизации стоимости строительства в условиях экономического кризиса // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. Самара, 2016. С. 316–319.

15. *Коркин А.М., Павлов В.А., Мотус С.Э., Рымшин А.Н., Орехов А.С., Повалкович Н.А. и др.* Автоматизация применения типовой проектной документации в НК «Роснефть» // Нефтяное хозяйство. 2018. № 8. С. 100–101. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-8-100-101

16. *Prušková K.* Reducing failures rate within the project documentation using building information modelling, especially level of development // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 146. P. 01009. DOI: 10.1051/matecconf/201814601009

17. *Jankowski B., Prokocki J., Krzemiński M.* Functional assessment of BIM methodology based on implementation in design and construction company // Procedia Engineering. 2015. Vol. 111. Pp. 351–355. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.100

18. *Kozlovska M., Mackova D., Spisakova M.* Survey of construction management documentation usage in planning and construction of building project // Procedia Engineering. 2016. Vol. 161. Pp. 711–715. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.747

19. *Oleinik P., Yurgaytis A., Popova A.* Planning of design works and formation of the initial permissive documentation for projects of general education institutions // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 05023. DOI: 10.1051/matecconf/201825105023

20. *Moreno C., Olbina S., Issa R.R.* BIM use by Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry in educational facility projects // Advances in Civil Engineering. 2019. Pp. 1–19. DOI: 10.1155/2019/1392684

Поступила в редакцию 23 февраля 2021 г.
Принята в доработанном виде 27 мая 2021 г.
Одобрена для публикации 2 июня 2021 г.

Об авторах: **Владислава Алексеевна Алиулова** — магистр; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 854705, ResearcherID: R-1282-2018, ORCID: 0000-0002-6959-050X; aliulova.va@edu.spbstu.ru;

Марина Вячеславовна Петроченко — кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 589472, Scopus: 56233437400, ResearcherID: C-7573-2019, ORCID: 0000-0002-4865-5319; petrochenko_mv@spbstu.ru.

REFERENCES

1. Aksenova E., Ordinian V. Improving the quality of project documentation when implementing information modeling technology and PMBOK planning methodology. *Fundamental and applied research in science and education : a collection of articles on the results of the International Scientific and Practical Conference*. Ufa, 2019; 124-129. (rus.).

2. Golubova O. Indicators for assessing the quality of design and estimate documentation in construction. *Actual problems of the economics of construction and urban economics : contributions of the International Scientific and Practical Conference*. Minsk, BNTU, 2015; 55-65. (rus.).

3. Kiseleva K. The quality control system of project documentation is the piece of the quality management system of the project organization. *Problems of Economics and Construction Management in an Environmentally Oriented Development : materials of the All-Russian Scientific and Practical Online Conference with International Participation and Elements*

of a Scientific School for Youth. Irkutsk, 2014; 188-196. (rus.).

4. Samit I., Manakova I. Application of tools and methods in the project activity of the organization. *Science and innovation in the XXI century : topical issues, discoveries and achievements: collection of articles of the VI International Scientific and Practical Conference*. Penza, 2017; 171-174. (rus.).

5. Bashkirova E., Kozhevnikov I. Problems and prospects of application of cost-effective design documentation in architectural engineering. *Traditions and innovations in construction and architecture. Construction : a collection of articles*. Samara, 2019; 578-583. (rus.).

6. Drokov S. Data from documented areas of the organization and their reuse. *Herald of VNIIDAD*. 2019; 3:16-24. (rus.).

7. Kuznetsova K. Research and analysis of scientific, methodological and regulatory frameworks for assessing the effectiveness of design documentation for capital construction projects. *ACTUAL SCIENTIFIC RESEARCH 2018 : results of the XXXVII International Scientific and Practical Conference*. Astrakhan, 2018; 153-156. (rus.).

8. Vasileva A. Features of the application of reuse design documentation. *Investments, construction, real estate as drivers of socio-economic development of the territory and improving the quality of life of the population : results of the X International Scientific and Practical Conference*. Tomsk, 2020; 645-648. (rus.).

9. Poznakhirko T., Topchy D.V. Specificity of BIM integration into project documentation design process. *Construction Production*. 2020; 1:69-72. (rus.).

10. Maleeva T., Selyutina L., Frolova N. Use of modern technology of information modeling in capital construction object life cycle management. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019; 687:044002. DOI: 10.1088/1757-899X/687/4/044002

11. Tukhvatullin R.R. Economic efficiency calculation method of the standardized design decisions automated design methods introduction. *Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2014; 1:54-56. (rus.).

12. Kagan P.B., Slavgorodskaya A.N. Economic efficiency of application of the registry of the typical design documentation. *Economics and Entrepreneurship*. 2014; 9(50):818-820. (rus.).

13. Tuhacek M., Svoboda P. Quality of project documentation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 471:052012. DOI: 10.1088/1757-899X/471/5/052012

14. Bocharov A., Serdiuk M. Typical project as an effective tool for optimizing the cost of construction in an economic crisis. *Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Construction*. Samara, 2016; 316-319. (rus.).

15. Korkin A.M., Pavlov V.A., Motus S.E., Rymshin A.N., Orekhov A.S., Povalkovich N.A. et al. Automated use of standard design documentation in Rosneft oil company. *Oil Industry*. 2018; 8:100-101. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-8-100-101 (rus.).

16. Prušková K. Reducing failures rate within the project documentation using Building Information Modelling, especially Level of Development. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 146:01009. DOI: 10.1051/matecconf/201814601009

17. Jankowski B., Prokocki J., Krzemiński M. Functional assessment of BIM methodology based on implementation in design and construction company. *Procedia Engineering.* 2015; 111:351-355. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.100

18. Kozlovska M., Mackova D., Spisakova M. Survey of construction management documentation usage in planning and construction of building project. *Procedia Engineering*. 2016; 161:711-715. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.747

19. Oleinik P., Yurgaytis A., Popova A. Planning of design works and formation of the initial permissive documentation for projects of general education institutions. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:05023. DOI: 10.1051/matecconf/201825105023

20. Moreno C., Olbina S., Issa R.R. BIM use by Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry in educational facility projects. *Advances in Civil Engineering*. 2019; 1-19. DOI: 10.1155/2019/1392684

Received February 23, 2021.
Adopted in revised form on May 27, 2021.
Approved for publication on June 2, 2021.

Bionotes: **Vladislava A. Aliulova** — master; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytekhnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 854705, ResearcherID: R-1282-2018, ORCID: 0000-0002-6959-050X; aliulova.va@edu.spbstu.ru;

Marina V. Petrochenko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytekhnicheskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 589472, Scopus: 56233437400, ResearcherID: C-7573-2019, ORCID: 0000-0002-4865-5319; petrochenko_mv@spbstu.ru.

УДК 69.059.6 DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.741-750

Технико-экономические показатели производства работ по демонтажу многоэтажного здания в условиях сложившейся застройки

Д.М. Мазурин[1, 2], М.Е. Дементьева[2]
[1] Группа компаний «КрашМаш» (ГК «КрашМаш»); г. Москва, Россия;
[2] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Наблюдается рост числа многоэтажных и высотных зданий, что особенно актуально для крупных городов. Подобное обновление застройки мегаполисов осуществляется не только путем освоения свободных пространств, но и за счет ликвидации зданий, жизненный цикл которых подходит к завершению. Возникает проблема выбора способа сноса зданий, поскольку традиционные применяемые в мировой практике способы не позволяют ликвидировать здания свыше 15 этажей. Поэтому с ростом этажности зданий, а также с учетом плотности окружающей застройки и ужесточения норм безопасности возникает потребность в совершенствовании технологий демонтажа, в том числе с точки зрения повышения экологической безопасности при производстве работ, что обосновывает актуальность данного исследования. Предмет исследования — технико-экономические показатели производства работ по поэлементной разборке и механическому сносу, выполняемых последовательно при ликвидации многоэтажного здания с различными конструктивными особенностями. Цель работы — изучение технико-экономических показателей демонтажных работ, выполняемых в условиях плотной городской застройки, с учетом особенностей методов организации работ, объемно-планировочных и конструктивных характеристик здания.

Материалы и методы. На основе данных натурных наблюдений методом фотофиксации и хронометража произведены замеры времени демонтажа при ликвидации многоэтажного здания. С помощью метода математического анализа получены технико-экономические показатели. Определение рабочих зон, фронта, объема работ осуществлялось с применением двухмерной системы моделирования AutoCAD.

Результаты. Рассмотрены особенности производства работ при поэлементной разборке и механическом сносе многоэтажного здания, выявлены зависимости технико-экономических показателей от характеристик здания.

Выводы. Выявлены проблемные области при использовании таких способов демонтажа многоэтажного здания, как поэлементная разборка и механический снос. Результаты работы могут быть использованы для рационализации технологии производства демонтажных работ с учетом особенностей окружающей застройки, а также характеристик здания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: механический снос, поэлементная разборка, технология и организация работ

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Мазурин Д.М., Дементьева М.Е.* Технико-экономические показатели производства работ по демонтажу многоэтажного здания в условиях сложившейся застройки // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 6. С. 741–750. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.741-750

Dismantling a multi-storey building in the conditions of a built-up area: engineering and economic indicators

Dmitry M. Mazurin[1, 2], Marina E. Dement'eva[2]
[1] Group of Companies CrushMash; Moscow, Russian Federation;
[2] Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In the contemporary world, the number of multi-storey and high-rise buildings goes up, and this is the case of central districts of large cities. This renewal of built environments in megalopolises takes the form of development of unoccupied spaces, which grow smaller year after year, and liquidation of buildings whose life cycle is coming to an end. In this regard, there arises a problem of choosing the building demolition method, since traditional techniques, used worldwide, do not allow for the liquidation of buildings that have more than 15 floors. Therefore, given the growing number of floors, densely built-up areas, and tighter safety regulations, there is a need to improve dismantling technologies, including tighter environmental safety requirements applied to dismantling works, and this necessity substantiates the relevance of this research. The subject of this work is the engineering and economic indicators of the element-wise deconstruction and mechanical demolition, performed as a sequential set of works that end in the elimination of a multi-storey building, having

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

© Д.М. Мазурин, М.Е. Дементьева, 2021
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

various design features. The purpose of this study is to explore the engineering and economic indicators of dismantling works carried out in densely built-up urban areas, taking into account work arrangement features, space-planning and design characteristics of a building to be liquidated.

Materials and methods. Given the findings of the field observations that represent photographic recording and timing, measurements were taken in respect of the time needed to perform the dismantling work in the process of liquidation of a multi-storey building. The method of mathematical analysis was employed to obtain the engineering and economic indicators of dismantling works. The work space, the scope and amount of work were identified using AutoCAD, a 2D modeling system.

Results. The co-authors have identified the features of the element-wise dismantling and mechanical demolition of a multi-storey building, dependences between engineering and economic indicators, as well as the characteristics of buildings.

Conclusions. The research, performed by the co-authors, allow to identify the bottlenecks of such methods of dismantling a multi-storey building, as its element-wise dismantling and mechanical demolition. The results of the work can be used to streamline the building dismantling technology, with regard to the features of surrounding buildings and the characteristics of the building to be liquidated.

KEYWORDS: mechanical demolition, element-wise dismantling, technology and organization of the work performance

FOR CITATION: Mazurin D.M., Dement'eva M.E. Dismantling a multi-storey building in the conditions of a built-up area: engineering and economic indicators. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(6):741-750. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.741-750 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В структуре современной городской застройки немалое место занимают многоэтажные здания, которые с течением времени физически и функционально устаревают [1–3]. Поэтому актуальной задачей является выбор безопасных и экономически обоснованных способов ликвидации подобных зданий с учетом особенностей сложившейся плотной застройки. На сегодняшний день довольно подробно проработаны технология и организация работ по ликвидации зданий массовых серий первого индустриального поколения, в частности, в публикациях [4–6] детально изложены особенности разборки 5-этажных жилых зданий. Вместе с тем анализ научных достижений в области производства демонтажа [7–15] свидетельствует о том, что существующие способы механического сноса зданий, которые чаще всего применяются в мировой практике, не позволяют ликвидировать здания свыше 15 этажей или 45 метров. Для сноса многоэтажных зданий и зданий повышенной этажности чаще всего альтернативой механическому методу служат разборка поэлементно или взрывной способ обрушения [16–18]. При этом взрывной способ редко используется в России и, кроме того, он небезопасен, особенно в мегаполисах.

Основные проблемы использования традиционных технологий при демонтаже многоэтажных зданий — ограниченная высота сноса, образование большого количества несортированного строительного мусора, а также загрязнение окружающей среды [19–24]. Так, применение механического способа, как известно, приводит к выделению большого объема строительной пыли, что неблагоприятно сказывается на экологической обстановке в районе сноса здания и требует дополнительных затратных мероприятий по пылеподавлению, например использование водяных пушек.

Один из перспективных способов демонтажа — поэлементный демонтаж, среди преимуществ которого следует отметить такие возможности, как повторное использование строительных материалов, применимость при сносе зданий свыше 15 этажей, допустимость выполнения работ в стесненных условиях. Недостатки этого способа — повышенные требования к безопасности, зависимость от применяемых средств вертикального транспорта, дополнительные финансовые затраты на обследование конструкций разбираемого здания, разработка детального проекта производства работ. В этой связи можно констатировать, что на данный момент недостаточно исследований современных технологий ликвидации многоэтажных и высотных зданий различной конфигурации, отсутствует нормативная база в области экологической оценки таких мероприятий работ. Поэтому для экономичного и экологически безопасного демонтажа многоэтажных зданий необходим анализ опыта производства работ на реальном объекте, что обосновывает актуальность данного исследования.

Цель исследования — изучение технико-экономических показателей демонтажных работ на конкретном примере, выполняемых в условиях плотной городской застройки, с учетом особенностей методов организации работ, объемно-планировочных и конструктивных характеристик здания. Задачи:

Изучение особенностей здания и их влияния на выбор способа демонтажа.

Определение стоимости и трудоемкости выполняемых работ.

Выполнение сравнительного анализа технико-экономических показателей рассматриваемых способов демонтажных работ на многоэтажном здании.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — способы демонтажа многоэтажного здания в условиях плотной городской застройки. В качестве примера рассматривается здание гостиницы, запроектированной Центральным научно-исследовательским институтом экспериментального и типового проектирования жилища (ЦНИИЭП жилища) по индивидуальному

проекту и построенной перед летними Олимпийскими играми в конце 1970-х годов. В начале 2000-х годов гостиница достраивалась на два этажа. Суммарная высота здания составляет 67,66 м. Предмет изучения — технико-экономические показатели производства работ по поэлементной разборке и механическому сносу, выполняемых последовательно при ликвидации многоэтажного здания гостиницы.

Согласно требованиям СП 325.1325800.2017 перед демонтажем зданий проводится техническое обследование, которое необходимо для выбора способа демонтажа, тщательной проработки технологии, определения количества строительных материалов для дальнейшей переработки. В анализируемом здании рассматривается только надземная часть, без подвала и фундамента.

Конструктивной схемой здания является неполный каркас, несущими конструкциями которого служат колонны, наружные и внутренние панели, на которые опираются перекрытия. Пространственная жесткость конструкций достигается взаимной работой несущих стен, плит перекрытий, покрытия, ригелей и диафрагм жесткости в виде лестнично-лифтовых узлов. Обследуемое здание прямоугольной формы в плане, габариты по осям составляют 17,7 × 69,3 м. Фактическое число этажей — 21, высота типового этажа — 2,8 м. В уровне 1–2 этажей несущие конструкции — массивные стойки и пилоны, выполненные из монолитного железобетона сечением 700 × 1300 мм. Наружные стены — керамзитобетонные панели толщиной 300 мм. Внутренние и торцевые наружные стены с 1 по 19 этаж выполнены из сборных железобетонных панелей толщиной 200 мм. Перекрытия с 1 по 19 этаж изготовлены из сборных железобетонных многопустотных панелей толщиной 220 мм. На 20 этаже несущими конструкциями являются колонны и перекрытия монолитные железобетонные толщиной 200 × 200 мм и 160 мм соответственно. Несущие стены на 21 этаже выполнены из кирпичной кладки толщиной 380 мм. Общее техническое состояние несущих конструкций обследуемого здания оценивается как работоспособное, но вследствие функционального устаревания, а также намерений собственника дорогостоящей земли здание решено ликвидировать.

Во время исследования на объекте для фиксации времени проведения работ использовался способ выборочного хронометража. Также производился замер выполненного объема работ в день и одновременно велась их фотофиксация (рис. 1). После окончания замеров данные наблюдения обрабатывались методом математического анализа и систематизировались.

Поскольку рассматриваемое здание гостиницы имеет разные конструктивные особенности в зависимости от этажа, то это повлияло на выбор способов демонтажа со своими технологическими решениями:

• с 21 по 17 этаж выполнялся поэлементный демонтаж здания гостиницы с отметки +67,66 м до отметки +44,65 м с использованием двух башенных кранов, малогабаритной техники и ручного труда. Такой выбор способа демонтажа был обусловлен отсутствием специализированных средств механизации — экскаваторов-разрушителей, способных работать со зданием такой высоты. На данном этапе поэтажно осуществлялись демонтаж кирпичной кладки на 21 этаже, демонтаж монолитных конструкций на 20 этаже и поэлементная разборка панелей с 19 по 17 этаж;

• с 16 по 1 этаж — механический снос здания гостиницы с отметки +44,65 м до отметки ±0,00 м с помощью экскаваторов. На этом этапе поэтажно осуществлялись снос экскаватором с навесным оборудованием типа гидравлические ножницы с 16 по 3 этаж и снос экскаваторами с навесным оборудованием типа гидравлический молот со 2 по 1 этаж. Данный способ сноса является самым распространенным в нашей стране, что и определило его выбор.

В соответствии с СП 325.1325800.2017 и СТО НОСТРОЙ 2.33.53-2011 ликвидация зданий проводится в три цикла — подготовительные работы строительной площадки и средств механизации, предварительный демонтаж технических систем и элементов отделки, демонтаж (обрушение) стро-



a *b* *c*

Рис. 1. Фотофиксация производства демонтажных работ: *a* — общий вид гостиницы; *b* — строповка разбираемых конструкций; *c* — применение средств механизации при демонтажных работах

Fig. 1. The photo of the building dismantling process: *a* — the general view of the hotel; *b* — the slinging of the constructions to be dismantled; *c* — using labour saving devices to perform the dismantling work

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6. 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6. 2021

ительных конструкций. Технологии производства работ всех циклов довольно подробно описаны в трудах [4–6]. Однако в связи с индивидуальными особенностями здания в данной работе акцент сделан на исследование технико-экономических показателей производства работ третьего цикла, т.е. работ по демонтажу (обрушению) несущих и ограждающих конструкций надземной части здания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При производстве работ по демонтажу конструкций с 21 по 17 этаж в каждом помещении вырезались и огораживались технологические отверстия в перекрытиях размером 0,5 × 0,5 м для перемещения мелких отходов демонтажа на нижележащее перекрытие. До отключения электроэнергии от здания лифты опускались на первый этаж, разгружался противовес от грузов. В последующем часть строительных отходов сбрасывалась в лифтовые шахты и технологические отверстия с помощью мини-погрузчика Bobcat. Разборка внутренних перегородок велась параллельно с демонтажем несущих конструкций.

Несущие стены из кирпичной кладки на 21 этаже разрушались с помощью отбойных молотков и мини-экскаваторов с навесным оборудованием типа гидравлический молот и загружались лопатами в тачки или мини-бульдозерами спускались в лифтовые шахты.

Плиты перекрытия и колонны из монолитного железобетона на 20 этаже разбирались с помощью отбойных молотков и мини-экскаваторов с навесным оборудованием. Из монолитных плит перекрытия готовили элементы с габаритами 3 × 3 м, в последующем в них делались отверстия для строповки, и по краям срезалась арматура пропановым резаком. После этого элементы перемещались в подготовленную зону складирования башенными кранами.

Демонтаж плит перекрытий, а также наружных и внутренних панелей с 19 по 17 этаж производился при помощи башенных кранов. Для всех элементов была определена общая технологическая последовательность их демонтажа:

- расчистка швов от цементно-песчаного раствора между всеми железобетонными элементами;
- сверление отверстия для продевания стропов при помощи отбойных молотков;
- строповка элемента, подтягивание строп, резка закладных деталей при помощи пропанового резака;
- перемещение элемента в подготовленную зону складирования башенными кранами.

Технологическая последовательность демонтажа панелей с 19 по 17 этаж выбиралась исходя из большего количества звеньев рабочих и производительности башенных кранов на двух захватках, разбитых на примерно одинаковые объемы работ (рис. 2).

В среднем на один элемент один башенный кран тратил 25 минут. Особенностью производства работ являлось то, что в итоге на одной захватке могли работать по два звена рабочих (на верхнем и нижнем этаже) с отставанием в два пролета, направление демонтажа которых шло от крайних осей к центру здания. Последовательность демонтажа плит перекрытий, наружных и внутренних панелей на примере первой захватки в осях I–VII/A–C показана на рис. 3, спецификация разбираемых элементов представлена в табл. 1. При выборе технологической последовательности учитывалась необходимость соблюдения таких условий производства работ, чтобы каждый элемент самопроизвольно не обрушался в процессе демонтажа, как рекомендовано в своде правил.

С 16 по 1 этаж снос здания выполнялся механическим способом. При этом с 16 по 3 этаж обрушение конструкций осуществлялось после-

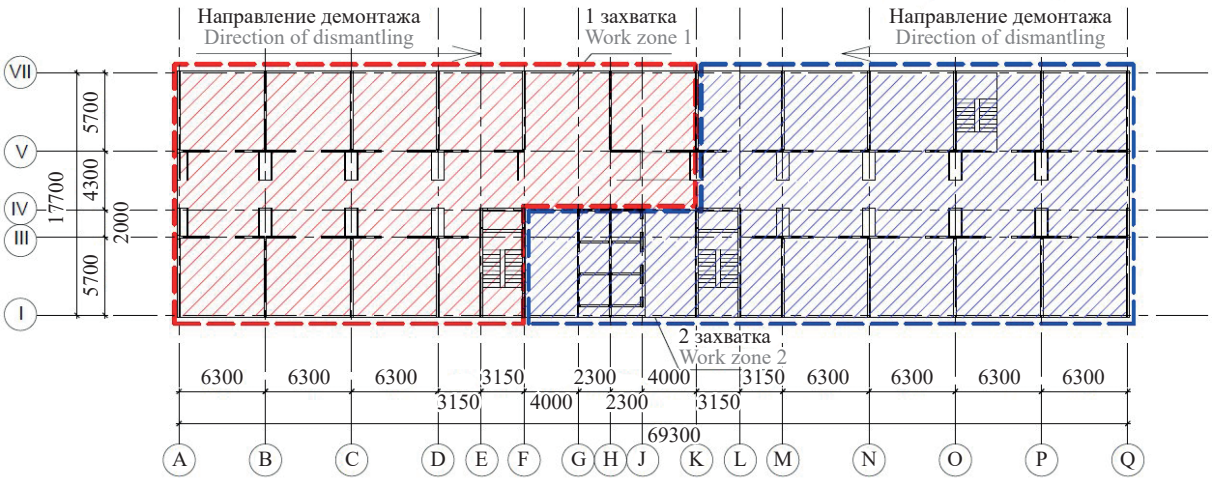


Рис. 2. Пример разбивки здания гостиницы на две захватки для поэлементного демонтажа с 19 по 17 этаж

Fig. 2. A sample breakdown of a hotel building into two work zones for their element-wise dismantling (19th to 17th floor)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

довательно по движению экскаватора с навесным оборудованием типа гидроножницы на разбираемое здание. Работа производилась в общем направлении сверху вниз с последовательным устранением горизонтальных и вертикальных конструктивных элементов. При сносе применялись методы ведения работ, включающие в себя поэтапную разборку с делением конструкций на отдельные элементы. После сноса происходило дробление железобетонных элементов с разделением арматуры от железобетона.

Механическое обрушение монолитных конструкций с 1 по 2 этаж выполнялось дроблением с помощью навесного оборудования типа гидравлический молот.

Результаты замеров объемов работ в ходе натурных наблюдений за демонтажем, выполняемым рас-

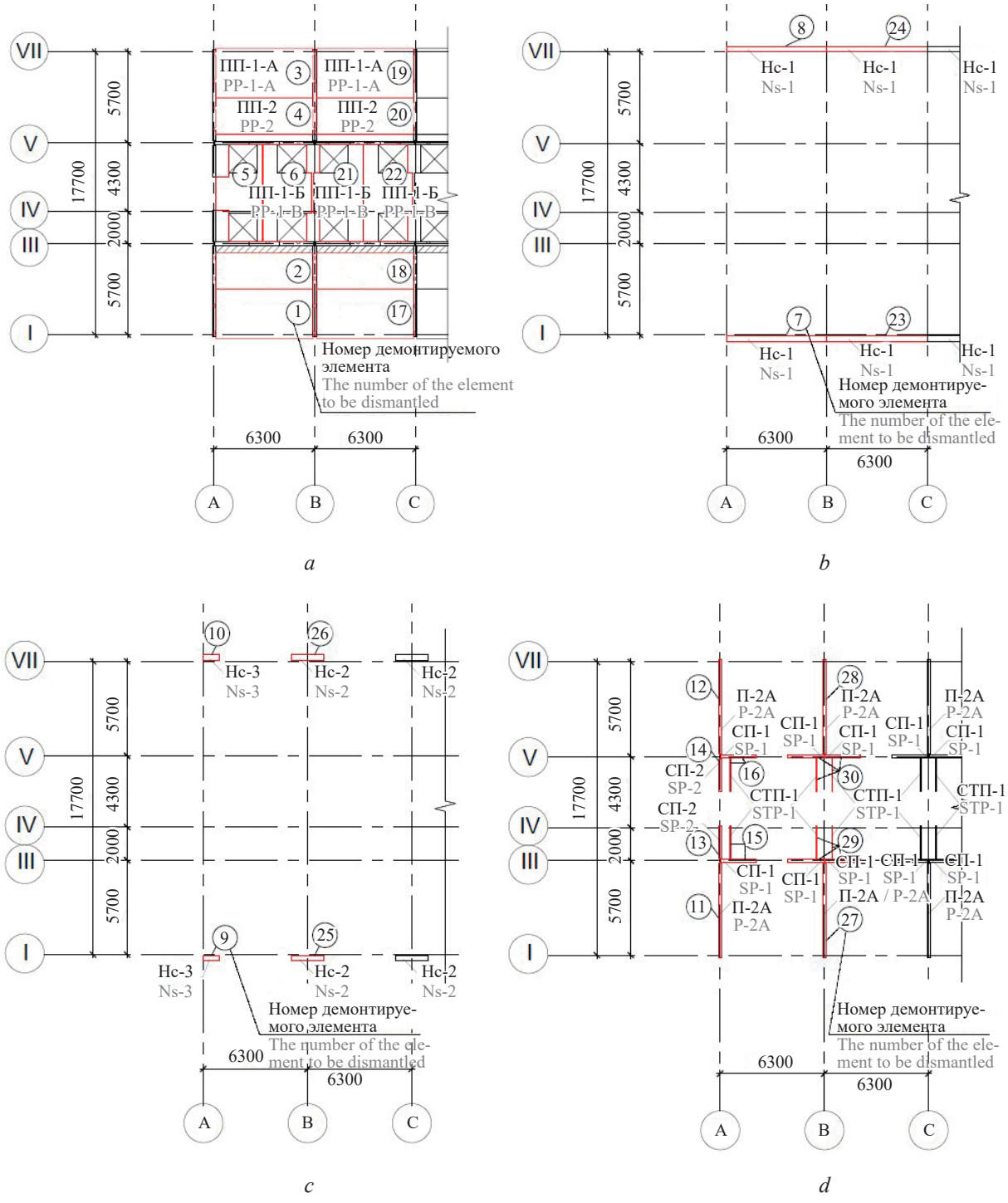


Рис. 3. Последовательность поэлементного демонтажа конструкций с 19 по 17 этаж: *a* — демонтаж плит перекрытий; *b*, *c* — демонтаж наружных стеновых панелей; *d* — демонтаж внутренних стеновых панелей

Fig. 3. The sequence of the element-wise dismantling of the constructions of 19th to 17th floors: *a* — the dismantling of the floor slabs; *b*, *c* — the dismantling of external wall panels; *d* — the dismantling of inner wall panels

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

Табл. 1. Спецификация демонтируемых конструкций с 19 по 17 этаж (к рис. 3)

Table 1. The list of constructions to be dismantled on the 19th to 17th floors (as a supplement to Fig. 3)

Последовательность демонтажа (номер на рис. 3) The sequence of dismantling works (the number is specified in Fig. 3)	Марка конструкции Construction brand	Наименование конструкции Construction type	Размеры конструкции, м Dimensions of the construction, m	
			Длина / Length	Ширина / Width
1, 3, 17, 19	ПП-1-А / PP-1-A	Плита перекрытия / Floor slab	6,290	3,090
2, 4, 18, 20	ПП-2 / PP-2	Плита перекрытия / Floor slab	6,290	2,265
5, 6, 21, 22	ПП-1-Б / PP-1-B	Плита перекрытия / Floor slab	6,290	3,090
11, 12, 27, 28	П-2 А / P-2 A	Внутренняя стеновая панель Inner wall panel	5,700	2,760
15, 16	СП-1 / SP-1	Внутренняя стеновая панель Inner wall panel	2,160	2,760
13, 14	СП-2 / SP-2	Внутренняя стеновая панель Inner wall panel	1,960	2,760
29, 30	СТП-1 / STP-1	Внутренняя стеновая панель (ненесущая) Inner wall panel (non-bearing)	2,000	2,480
7, 8, 23, 24	Нс-1 / Ns-1	Наружная стеновая панель, верхний ярус Exterior wall panel, top tier	6,280	1,050
25, 26	Нс-2 / Ns-2	Наружная стеновая панель, нижний ярус Exterior wall panel, bottom tier	1,990	1,050
9, 10	Нс-3 / Ns-3	Наружная стеновая панель, нижний ярус Exterior wall panel, bottom tier	0,980	1,050

сматриваемыми способами, представлены в табл. 2. Установлено, что наибольшая выработка ручных процессов, проводимых с использованием средств малой механизации, зафиксирована при разборке панельных конструкций, которая превышает выработку при демонтаже кирпичных конструкций в 1,3 раза, монолитных конструкций в 3 раза. Наибольшая выработка механизированных процессов характерна для разборки кирпичных стен, в частности она в 1,5 раза выше, чем при разборке панельных конструкций, и в 3,5 раза выше, чем при разборке монолитных конструкций. При этом существенна разница в выработке при выполнении механического сноса в зависимости от материала конструкции: при обрушении панельных конструкций она выше более чем в 9 раз по сравнению с обрушением монолитных конструкций.

Выявлено, что удельная стоимость работ по механическому обрушению панельных конструкций на порядок ниже стоимости производства работ по другим конструкциям. При этом удельная стоимость работ по механическому обрушению монолитных конструкций составляет 64 % от стоимости работ по разборке аналогичных конструкций.

На рис. 4 представлены данные о среднем времени выполнения демонтажных работ на один этаж. Результаты хронометражных замеров свидетельствуют о том, что время демонтажа конструкций, выполненных из монолитного железобетона, при механическом способе больше в 4 раза, чем при поэлементной разборке. Отмечается разница во времени демонтажа панельных конструкций разными методами в 7 раз. Поэлементный демонтаж монолитных конструкций длится в 2 раза дольше демонтажа кирпичных конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках исследования было рассмотрено производство демонтажных работ при ликвидации многоэтажного здания гостиницы, выполненного по индивидуальному проекту. По результатам натурных наблюдений, фотофиксации и хронометражных замеров рассчитаны технико-экономические показатели производства демонтажных работ, осуществляемых двумя способами: поэлементной разборкой и механическим сносом, и сделаны следующие выводы:

1. Особенностью здания служит многообразие применяемых для несущих конструкций материалов (кирпичные конструкции, железобетонные панели, монолитный железобетон), что оказало существенное влияние на выбор как способа демонтажа, так

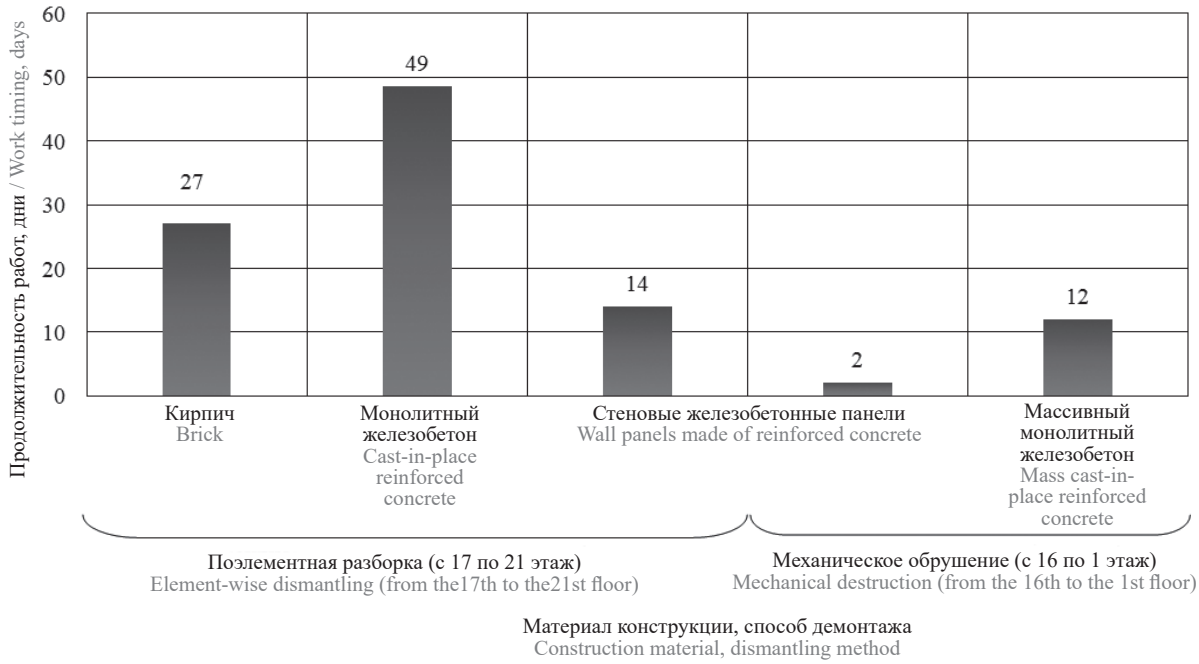


Рис. 4. Удельная продолжительность выполнения демонтажных работ на один этаж

Fig. 4. Per-unit timing of the dismantling work per floor

и технико-экономических показателей производства работ. Установлено, что наиболее трудоемким процессом является разборка монолитных конструкций при большой доле ручного труда, в то время как трудоемкость механического обрушения аналогичных конструкций ниже в 9 раз. Вместе с тем выявлено, что разница в удельной стоимости производства работ составляет порядка 36 %.

2. Очевидно экологическое преимущество способа поэлементной разборки, заключающееся как в меньшем пылеобразовании, так и в меньшей доле несортированного строительного мусора, что подтверждено результатами натурного наблюдения. Так, примерно 25 % строительного мусора при демонтаже с 21 по 17 этаж перемещалось через технологические и лифтовые проемы на нижележащие этажи. Остальной мусор складировался в контейнеры и башенными кранами опускался на стройплощадку вниз. Часть плит перекрытия использовалась на строительной площадке под основания складов и временных дорог.

3. Сравнение технико-экономических показателей двух способов демонтажа для панельных конструкций показало значительное преимущество механического обрушения по всем показателям. При этом трудоемкость и стоимость работ по поэлементной разборке кирпичных и панельных конструкций довольно близки при разнице во времени производства работ почти в 2 раза. Однако увеличивать состав звена нецелесообразно, поскольку это приведет к увеличению стоимости работ.

Резюмируя вышесказанное, необходимо отметить, что повышенная этажность зданий, плотность застройки, новые стандарты экологической безопасности, ужесточающиеся требования к переработке отходов обосновывают перспективность метода поэлементного демонтажа зданий. Учитывая высокую стоимость земли в крупных городах, а также значительную долю серийных домов массового домостроения панельного, блочного и модульного типов, такой метод демонтажа требует оптимизации производства работ путем усовершенствования механизации и автоматизации отдельных процессов, комбинации с другими методами сноса, а также повышения производительности ручных операций, что обосновывает необходимость дальнейших дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Oleinik P., Kuzmina T.* The stages of demolition of buildings of the first industrial generation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 062016. DOI: 10.1088/1757-899X/365/6/062016

2. *Dement'eva M., Terekhin I., Lebedeva A.* Risk management to ensure the exploitation reliability of high-rise buildings // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 06012. DOI: 10.1051/matecconf/201825106012

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

3. *Korol E., Ostyakova A.V., Perfilowa E.* The operational characteristics of the housing stock as a result of renovation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 062027. DOI: 10.1088/1757-899X/365/6/062027

4. *Колосков В.Н., Олейник П.П., Тихонов А.Ф.* Разборка жилых зданий и переработка их конструкций и материалов для повторного использования. М. : Изд-во АСВ, 2004. 199 с.

5. *Олейник П.П., Олейник С.П.* Организационные решения по разборке (сносу) жилых зданий типовых серий. М. : МГСУ, 2008. 54 с.

6. *Олейник П.П., Бродский В.И., Кузьмина Т.К., Чередниченко Н.Д.* Теория, методы и формы организации строительного производства. В 2-х ч. Ч. 2. М. : МГСУ, 2020. 334 с.

7. *Олейник П.П., Бродский В.И.* Организация работ по сносу зданий и сооружений в подготовительный период строительства // Технология и организация строительного производства. 2014. № 3. С. 46–49.

8. *Савушкина Т.Ю., Бродский В.И.* Механизация работ при сносе (демонтаже) зданий и сооружений // Инновационные технологии в образовании и науке : сб. мат. Междунар. науч.-практ. конф. Чебоксары, 2017. С. 70–74.

9. *Фахратов М.А., Сулейманов Х.А., Болотин О.А.* Особенности бетонирования и демонтажа зданий в рамках поэлементной системы // Инновации и инвестиции. 2018. № 4. С. 341–344.

10. *Доладов Ю.И., Добрянин К.Э., Хмылева О.Ю., Васильчикова З.Ф.* Демонтаж здания в черте города // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8. № 2 (31). С. 60–64. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.02.10

11. *Алабин А.В., Свищева М.А.* Преимущества создания проекта реконструкции, модернизации и демонтажа объектов строительства с использованием BIM технологий // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 1. С. 92–96.

12. *Юрченко В.В.* Организация строительной площадки при демонтаже или сносе здания и сооружения // Дни студенческой науки : сб. докл. науч.-техн. конф. М., 2019. С. 1267–1269.

13. *Korol E., Gaydysheva Y.* Intercomparison of building dismantling methods // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 661. P. 012141. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012141

14. *Zheng W., Su Z., Zhou W.* Progress and prospect on demolition technology of masonry structures // Harbin Gongye Daxue Xuebao. 2019. Vol. 51. Issue 12. Pp. 13–19. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201812053

15. *Дементьева М.Е., Мазурин Д.М.* Особенности технологических решений по сносу зданий при реновации городской застройки // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования : сб. докл. Первой Национальной конф. М., 2020. С. 831–836.

16. *Synitsyn D.* Blasting operations in conditions of buildings and facilities reconstruction // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. 2017. Pp. 720–728. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_76

17. *Sinitsyn D.* Drilling-and-blasting method of demolition // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 170. P. 03019. DOI: 10.1051/matecconf/201817003019

18. *Галаева Н.Л.* Использование метода взрыва для сноса зданий и сооружений в условиях городской застройки // Перспективы науки. 2019. № 5 (116). С. 54–56.

19. *Щербина Е.В., Аверин И.В., Васильчик Е.И.* Особенности размещения объектов недвижимости на площадках, занятых техногенными грунтами после сноса старых зданий // Вестник МГСУ. 2011. № 1–2. С. 136–140.

20. *Grigorieva L., Oleinik P.* Recycling waste wood of construction // Materials Science Forum. 2016. Vol. 871. Pp. 126–131. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.871.126

21. *Oleinik P., Kuzmina T., Zenov V., Melnichuk V.* Modeling of construction waste processing system development // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 251. P. 02032. DOI: 10.1051/matecconf/201825102032

22. *Понявина Н.А., Потехин И.А., Косовцева И.А., Столярова Т.А.* Развитие путей утилизации строительных отходов после сноса зданий и сооружений // Строительство и недвижимость. 2020. № 3 (7). С. 12–19.

23. *Аль-Бу-Али У.С.Д., Лесовик Р.В., Толстой А.Д., Ахмед А.А.* Оценка отходов от сноса разрушенных зданий и сооружений в Ираке // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2020. Т. 10. № 1 (32). С. 24–31. DOI: 10.21285/2227-2917-2020-1-24-31

24. *Suciu G., Beceanu C., Scheianu A., Petre I.* Construction and demolition waste based on the automatic recycling management // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings SGEM 2020, Energy and Clean Technologies. 2020. DOI: 10.5593/sgem2020/4.1/s18.030

Поступила в редакцию 12 апреля 2021 г.
Принята в доработанном виде 7 июня 2021 г.
Одобрена для публикации 7 июня 2021 г.

Об авторах: **Дмитрий Михайлович Мазурин** — инженер; **Группа компаний «КрашМаш» (ГК КрашМаш)**; 115054, г. Москва, ул. Дубининская, д. 57, стр. 2; аспирант кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Наци-**

ональный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1106725; dima.mazurin2017@yandex.ru;

Марина Евгеньевна Дементьева — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры жилищно-коммунального комплекса; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 309561, Scopus: 57194452801, ResearcherID: Q-3399-2017, ORCID: 0000-0002-1469-7297; 7dem@mail.ru.

REFERENCES

1. Oleinik P., Kuzmina T. The stages of demolition of buildings of the first industrial generation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:062016. DOI: 10.1088/1757-899X/365/6/062016

2. Dement'eva M., Terekhin I., Lebedeva A. Risk management to ensure the exploitation reliability of high-rise buildings. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:06012. DOI: 10.1051/matecconf/201825106012

3. Korol E., Ostyakova A.V., Perfilowa E. The operational characteristics of the housing stock as a result of renovation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:062027. DOI: 10.1088/1757-899X/365/6/062027

4. Koloskov V.N., Oleinik P.P., Tikhonov A.F. *Dismantling residential buildings and recycling their structures and materials for reuse*. Moscow, ASV, 2004; 199. (rus.).

5. Oleinik P.P., Oleinik S.P. *Organizational solutions for dismantling (demolishing) residential buildings of standard series*. Moscow, MGSU, 2008; 54. (rus.).

6. Oleinik P.P., Brodsky V.I., Kuzmina T.K., Cherednichenko N.D. *Theory, methods and forms of organization of construction production. In 2 parts. Part 2.* Moscow, MGSU, 2020; 334. (rus.).

7. Oleinik P.P., Brodsky V.I. Works organization on buildings and structures demolition in construction preparatory period. *Technology and Organization of Construction Production*. 2014; 3:46-49. (rus.).

8. Savushkina T.Yu., Brodsky V.I. Mechanization of work with demolition (dismantling) of buildings and structures. *Innovative Technologies in Education and Science: Collection of Materials of the International Scientific and Practical Conference.* Cheboksary, 2017; 70-74. (rus.).

9. Fakhratov M.A., Suleymanov Kh.A., Bolotin O.A. Features of concreting and dismantling of buildings within the framework of the pelement system. *Innovation and Investment*. 2018; 4:341-344. (rus.).

10. Doladov Y.I., Dobryanin K.E., Khmylyova O.Yu., Vasilchikova Z.F. Dismantling of the building in the city. *Urban Construction and Architecture*. 2018; 8:2(31):60-64. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.02.10 (rus.).

11. Alabin A.V., Svishcheva M.A. Advantages of facilities' reconstruction, modernization and dismantling project creation using BIM technologies. *Scientific and Technical Volga region Bulletin*. 2019; 1:92-96. (rus.).

12. Yurchenko V.V. Organization of the construction site when dismantling or demolishing buildings and structures. *Days of Student Science: Collection of Reports of the Scientific and Technical Conference*. Moscow, 2019; 1267-1269. (rus.).

13. Korol E., Gaydysheva Y. Intercomparison of building dismantling methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019; 661:012141. DOI: 10.1088/1757-899X/661/1/012141

14. Zheng W., Su Z., Zhou W. Progress and prospect on demolition technology of masonry structures. *Harbin Gongye Daxue Xuebao*. 2019; 51(12):13-19. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201812053

15. Dement'eva M.E., Mazurin D.M. Features of technological decisions on the demolition of buildings when renovating urban development. *Actual problems of the construction industry and education: Collection of reports of the First National Conference*. Moscow, 2020; 831-836. (rus.).

16. Synitsyn D. Blasting operations in conditions of buildings and facilities reconstruction. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017*. 2017; 720-728. DOI: 10.1007/978-3-319-70987-1_76

17. Sinitsyn D. Drilling-and-blasting method of demolition. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 170:03019. DOI: 10.1051/matecconf/201817003019

18. Galaeva M.L. The explosion method for demolition of buildings and structures in conditions of urban environment. *Science Prospects*. 2019; 5(116):54-56. (rus.).

19. Scherbina E.V., Averin I.V., Vasilchik E.I. Peculiarities of placing real estate objects on places ocupited technogenic ground after demolition old buildings. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 1-2:136-140. (rus.).

20. Grigorieva L., Oleinik P. Recycling waste wood of construction. *Materials Science Forum.* 2016; 871:126-131. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.871.126

21. Oleinik P., Kuzmina T., Zenov V., Melnichuk V. Modeling of construction waste processing system development. *MATEC Web of Conferences*. 2018; 251:02032. DOI: 10.1051/matecconf/201825102032

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

22. Ponyavina N.A., Potekhin I.A., Kosovtseva I.A., Stol'jarova T.A. The development of demolition wastes utilization ways after buildings deconstruction. *Construction and Real Estate*. 2020; 3(7):12-19. (rus.).

23. Albo Ali W.S., Lesovik R.V., Tolstoy A.D., Ahmed A.A. Quantification of waste materials from the demolition of destroyed buildings and structures in Iraq. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2020; 10(1):24-31. DOI: 10.21285/2227-2917-2020-1-24-31 (rus.).

24. Suciu G., Beceanu C., Scheianu A., Petre I. Construction and demolition waste based on the automatic recycling management. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings SGEM 2020, Energy and Clean Technologies.* 2020. DOI: 10.5593/sgem2020/4.1/s18.030

Received April 12, 2021.
Adopted in revised form on June 7, 2021.
Approved for publication on June 7, 2021.

BIONOTES: **Dmitry M. Mazurin** — engineer; **Group of Companies CrushMash**; build. 2, 57 Dubininskaya st., Moscow, 115054, Russian Federation; postgraduate student of the Department of Housing and Communal Services; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 1106725; dima.mazurin2017@yandex.ru;

Marina E. Dement'eva — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Housing and Communal Services; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 309561, Scopus: 57194452801, ResearcherID: Q-3399-2017, ORCID: 0000-0002-1469-7297; 7dem@mail.ru.

УДК 332.87 + 711.4
DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.751-769

Институт общественной опеки: инвестиции в границах исторических поселений и жизненный цикл городской среды

О.В. Бахарева[1], Л.И. Ажимова[2], А. Челани[3], Н.С. Большаков[4]
[1] Казанский государственный аграрный университет (Казанский ГАУ); г. Казань, Россия;
[2] Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ); г. Казань, Россия;
[3] Миланский технический университет; Милан, Италия;
[4] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ); Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Трансформация экономического пространства регионов на основе цифровизации и использования интеллектуальных технологий в жилищной сфере порождает эстетические и технические проблемы. При реализации стихийных инвестиционных проектов повышения энергоэффективности старого жилого фонда городов, в том числе памятников истории и культуры, а также зданий, формирующих историческую застройку, возникают определенные технические и эстетические последствия. Целью исследования является изучение реализованных инвестиционных проектов повышения энергоэффективности жилых домов на территории, смежной с границей исторического поселения регионального значения г. Казани.

Материалы и методы. Натурные обследования, фотофиксация результатов реализованных инвестиционных проектов по повышению энергоэффективности многоквартирных жилых домов жилого фонда на смежной территории — на границе исторического поселения г. Казани.

Результаты. Составлена классификация видов вмешательства эксплуатирующей фирмы, которые существенно изменяют исторические фасады, меняют единый архитектурно-исторический облик ансамбля улицы и порождают отрицательные экстерналии. Принимая во внимание перспективы роста спроса на рынке повышения энергоэффективности зданий старого жилого фонда, для максимизации общественного благосостояния предлагается рассмотреть механизм государственного вмешательства по защите архитектурно-исторической среды города как опекаемого блага на основе государственной политики по созданию благоприятных условий для внедрения инноваций в жилищной сфере в форме института общественной опеки.

Выводы. Институт общественной опеки позволит сохранять художественные архитектурные ансамбли города на протяжении жизненного цикла, бороться с паразитарной архитектурой, получать экономический эффект: обеспечить низкое потребление энергии в жилых зданиях старого жилого фонда городов, способствовать росту стоимости недвижимости и рентабельности инвестиционных проектов реставрации, воссоздания и реконструкции зданий исторической части города.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: регион, опекаемые блага, инвестиции, BIM, интеллектуальные технологии, городское планирование, граница исторического поселения, энергоэффективность, архитектурно-историческая среда, оценка жизненного цикла, институт общественной опеки

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Бахарева О.В., Ажимова Л.И., Челани А., Большаков Н.С.* Институт общественной опеки: инвестиции в границах исторических поселений и жизненный цикл городской среды // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 6. С. 762–780. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.762-780

Institution of public welfare: investments within historic settlements and the life cycle of the urban environment

Olga V. Bakhareva[1], Liliya I. Azhimova[2], A. Celani[3], Nicolai S. Bolshakov[4]
[1] Kazan State Agrarian University (Kazan SAU); Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation;
[2] Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation;
[3] Built Environment and Civil Engineering, Politecnico di Milano; Milan, Italia;
[4] Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); Saint Petersburg, Russian Federation

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

© О.В. Бахарева, Л.И. Ажимова, А. Челани, Н.С. Большаков, 2021
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

ABSTRACT

Introduction. The transformation of the economic space of the regions based on digitalization and the use of intelligent technologies in the housing sector gives rise to aesthetic technical problems. When implementing spontaneous investment projects to improve the energy efficiency of the old housing stock of cities, including historical and cultural monuments, as well as buildings that form historical buildings, technical and aesthetic consequences arise. The aim of the article is to study the implemented investment projects to improve the energy efficiency of residential buildings on the adjacent territory of the border of the historical settlement of regional significance in the city of Kazan.

Materials and methods. Full-scale inspection, photographic recording of the results of implemented investment projects to improve the energy efficiency of multi-apartment residential buildings of the housing stock on the adjacent territory of the border of the historical settlement of the city of Kazan.

Results. As a result, a classification was drawn up of the types of interventions of the operating company, which significantly change the historical facades, change the single architectural and historical appearance of the street ensemble and generate negative externalities. Taking into account the prospects for growth in demand in the market for improving the energy efficiency of buildings of old housing stock, in order to maximize public welfare, it is proposed to consider the mechanism of state intervention to protect the architectural and historical environment of the city as a patronized good on the basis of state policy to create favorable conditions for the introduction of innovations in the housing sector in the form of institute of public guardianship.

Conclusions. The institute of public guardianship will allow to preserve the artistic architectural ensembles of the city throughout the life cycle, to fight against parasitic architecture, to obtain an economic effect: to ensure low energy consumption in residential buildings of the old housing stock of cities, an increase in the value of real estate and the profitability of investment projects for the restoration, reconstruction and reconstruction of buildings in the historical part cities.

KEYWORDS: region, trusteeship goods, investments, BIM, intelligent technologies, urban planning, border of a historical settlement, energy efficiency, architectural and historical environment, life cycle assessment, public guardianship institute

FOR CITATION: Bakhareva O.V., Azhimova L.I., Celani A., Bolshakov N.S. Institution of public welfare: investments within historic settlements and the life cycle of the urban environment. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(6):762-780. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.762-780 (rus.).

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 16. Выпуск 6, 2021**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 16. Issue 6, 2021**

ВВЕДЕНИЕ

Цифровизация российской жилищной сферы связана с повышением энергоэффективности и снижением энергопотребления в общественном секторе, в частности в жилищной сфере, что возможно, в том числе при внедрении инновационных решений на основе интеллектуальных технологий и сквозных цифровых технологий [1]. Интеллектуальные здания создаются с использованием технологии информационного моделирования (BIM), используют интернет вещей, автоматизированные системы управления ресурсами, облачные хранилища, системы поддержки принятия решений, что позволяет создать комфортный микроклимат в помещениях жилых домов, снизить потребление дефицитных природных ресурсов и обеспечить домохозяйствам существенную экономию денежных средств при эксплуатации квартир. В то же время происходят изменения зданий, которые выполняются в ходе ремонта и приводят к различным положительным и отрицательным экстерналиями.

Проблема охраны культурного наследия остро стоит не только на международном уровне, но и на региональном. Наиболее активно и плодотворно эта работа поставлена в Европе. Здесь находится около половины памятников, входящих в памятники культурного наследия ЮНЕСКО, — 453 объекта материального наследия и еще 89 объектов нематериального наследия [2]. Начиная с середины 1950-х гг. Совет Европы разработал целый ряд правовых актов, направленных на сохранение европейского культурного наследия и создавших международно-правовую основу для сотрудничества европейских народов в этой области. Основным регулирующим документом служит Европейская культурная конвенция 1954 г., которая предполагает, что все ее участники обязаны принимать надлежащие меры для защиты памятников, имеющих культурную ценность для Европы[1].

Современная концепция Совета Европы в отношении культурного наследия основана на двух ключевых идеях: во-первых, осознании ценности и поддержке культурного разнообразия Европы, а во-вторых, выработке совместных решений против глобальных угроз, таких как глобализация, разрушение памятников в зонах конфликтов, природных, техногенных, антропогенных катастроф и т.д. [3].

Главной целью государственной экономической политики является увеличение производства и потребления экономических благ, в которых заинтересовано общество [4–6].

В случае провалов рынка, механизмом государственного регулирования создания опекаемых в обществе объектов являются институты общественных опекаемых благ [7]. Процессы цифровизации российской экономики приводят к расширению использования технологических инноваций в общественном секторе экономики [8], в том числе в жилищной сфере, что предполагает создание реальной и цифровой инфраструктуры фирм, государства, открытых систем, появление новой цифровой инфраструктуры цифровых платформ (платежные, новостные, социальные, электронные коммерче-

[1] European Cultural Convention. ETS No. 018. Paris, 19/12/1954.

ские, поисковые, игровые и пр.) на региональных, национальных и международных рынках [9–11].

Государственное регулирование инновационного развития экономики, в том числе создания и развития опекаемых благ, происходит на основе институциональных трансформаций, таких как субсидии расширенного воспроизводства производителям в различных секторах экономики; трансферты потребителям; ограничение или стимулирование производства, в том числе налоговое и кредитное стимулирование фирм, поддержка работы экосистем и открытых стандартов в общественном секторе на основе сквозных технологий; формирование общественно полезных целей и поддержка диффузии инновационных технологий и продуктов в экономике.

Рынок энергоэффективного строительства и эксплуатации многоквартирных жилых домов использует главную инновацию — строительство домов с низким потреблением энергии. Пионерская концепция пассивного дома [12] стала основой европейской политики преобразований трех секторов жилого фонда:

1) новое строительство;
2) старый жилой фонд;
3) памятники истории и культуры.

Сюда следует добавить новое направление применения инновационной технологии информационного моделирования зданий, интеллектуальных технологий строительства и моделирования энергетического баланса здания [13].

Сегменты рынка «старый жилой фонд» и «памятники истории и культуры» требуют больших усилий собственников по реализации концепции энергоэффективности зданий как с технической точки зрения, так и эстетической, а также мер государственного регулирования.

Для сохранения уникальности, достоверности, эстетической и художественной ценности опорной исторической застройки и всего предметно-пространственного окружения и развития исторических поселений в документах территориального планирования определены условия, при которых историческая среда признается объектом культурного наследия и основным градоформирующим потенциалом города, а город — историческим поселением [14].

Бережная реконструкция городов позволяет сохранить историю и культуру для жителей и гостей города, создать архитектурно-градостроительные решения, сохраняющие культурные ценности поселений [15–17].

В России в 2014 г. изданы Методические рекомендации оценки историко-культурной ценности поселения. Применение критериев историко-культурной ценности поселения в оценке недвижимости, расположенной в границах исторического поселения, которые «предназначены для проведения исследований, направленных на выявление и установление территории исторического поселения, и последующей оценки инвестиционной привлекательности данных территорий в населенном пункте, где расположено историческое поселение» [18].

Регламентирующие документы позволяют оперативно планировать режимы градостроительной реконструкции квартальной застройки и зависят от допустимого объема и следующих целей вмешательства: 1) архитектурно-градостроительных (воссоздание, консервация, реставрация, реновация, модерация, конструирование); 2) функциональных (реабилитация, регенерация, ревитализация); 3) экономических (реваloризация) [19].

Архитектурно-историческая ценность объектов устанавливается при изучении времени строительства, отнесении к определенному архитектурному стилю и предполагает анализ научно-познавательной ценности (исторический план, старые здания в подлинном материале), сохраняющихся традиций старого образа жизни, труда, быта, отдыха и археологический культурный слой, художественно-эстетической ценности (ценные ландшафты, панорамы и силуэты, памятники, ансамбли и достопримечательные места), самобытности и своеобразия городской жизни на улицах, площадях, скверах и бульварах, а также реализации парадигмы «историческое поселение как градообразующий фактор, способствующий привлечению инвестиций» [20].

Государственное регулирование исторических поселений предполагает защиту объектов в границах исторических поселений без учета смежных территорий на границе исторического поселения [21].

Исследования динамики изменения городской среды позволяют уточнять границы исторической городской среды [22], рассматривая морфологические зоны, исходя из этапности и периодизации формирования памятников истории и культуры. Так, в границы исторического поселения Выборг не входят значимые территории, которые имеют историческую и градостроительную ценность и, исходя из перспективы уточнения границ, могут быть присоединены к историческому поселению [23, 24] с учетом градостроительных особенностей преемственного возникновения и последующего развития [25], в том числе развития городских агломераций [26].

Своевременность мер охраны городской среды играет важную роль: «Историческое поселение должно служить механизмом не “развития”, а охраны целостного исторического ландшафта, реконструкция и строительство в нем регулируются так, чтобы они не нарушали сложившийся ландшафт, проект исторические поселения должен выноситься на общественное обсуждение в процессе разработки, как в Санкт-Петербурге. Старый город хранит в себе культурную память, которая транслируется через архитектуру. Убивая “ветхие” и “неценные” здания, мы бесследно стираем ее с физического и ментально-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

го пространства, лишаем себя возможности путешествовать во времени внутри города» [27].

Вместе с тем исторический центр является инвестиционно привлекательной территорией для новой застройки, конфликт заключается в реализации не столько сохранения исторической среды, сколько в уплотнительной новой застройке исторических кварталов и исчезновении ветхих кварталов, строительстве элитного жилья и «опустынивании» территории исторического центра городов, «Историческое поселение — главный на сегодня в России механизм, позволяющий городам заботиться о сохранении целостной исторической среды с ее ландшафтом и аутентичной «фоновой» застройкой. Остальные механизмы нацелены лишь на точечное сохранение отдельных объектов или их групп» [28]. В этом случае появляется новый уклад новых жителей исторического центра, главным образом в связи с использованием ими только автомобильного транспорта и загородных владений, где они проводят свободное время, в том числе праздники и выходные дни.

В перспективе реализации в России государственной политики энергоэффективности и энергосбережения будут приниматься меры по ремонту старого жилого фонда городов, памятников культуры и истории. Проблема повышения энергоэффективности старого жилого фонда города, в том числе исторической застройки, проявляется в стихийных разноплановых решениях об инвестициях домохозяйств, фирм, государственных органов и неоднозначных результатах изменения городского исторического ландшафта.

Возникает конфликт рационального поведения экономических агентов при реализации проектов повышения энергоэффективности зданий и эстетических последствий стихийных ремонтных работ, выполненных частными эксплуатирующими фирмами. Каким должно быть государственное вмешательство в работу рынка эксплуатации жилищного фонда как общественного сектора экономики? Как меры государственной политики и законодательство в области охраны объектов культурного наследия, исторических поселений и смежных с ними территорий позволят максимизировать общественное благосостояние? Действительно ли нужно сохранять объекты только на территории исторического поселения, а на смежных территориях не вмешиваться в работу рынка?

Цель исследования: поиск экономического механизма регулирования экстерналий на рынке энергоэффективности жилых зданий старого жилого фонда на смежной территории на границе исторического поселения города Казани.

Объектом исследования является спрос на рынке энергоэффективного строительства и эксплуатации многоквартирных жилых домов старого жилого фонда городов.

Предметом исследования являются экстерналии и провалы рынка, возникающие при реализации инвестиционных проектов частной эксплуатирующей компанией и собственниками многоквартирных домов при реконструкции и повышении энергоэффективности жилых зданий старого жилого фонда на ул. Вишневского на смежной территории, примыкающей к границе исторического поселения регионального значения города Казани.

Задачи исследования:

1) анализ спроса со стороны домохозяйств на энергоэффективный ремонт жилых зданий советского периода (1960–1980 гг.) и современной застройки;

2) анализ экстерналий, возникающих в результате реализации стихийных инвестиционных проектов и проведения ремонтных работ эксплуатирующей фирмой, в частности, по утеплению ограждающих конструкций фасадов зданий и реконструкции собственниками многоквартирных жилых домов;

3) анализ экономических проблем нерациональных расходов домохозяйств (на отопление и кондиционирование квартир) в жилых домах с высоким потреблением энергии, построенных в советский период (1960–1980 гг.), и современной застройки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании использованы методы натурного обследования, фотофиксации результатов реализованных инвестиционных проектов по повышению энергоэффективности многоквартирных жилых домов и анализа спроса домохозяйств на рынке повышения энергоэффективности старого жилого фонда на ул. Вишневского на смежной территории с границей территории исторического поселения регионального значения города Казани. Рассмотрен инвестиционный проект (модерация) долгостроя 2003 г. новым застройщиком по внешнему утеплению стен фасадов здания (первоначальный проект предполагал только внутреннее утепление).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим на примере ул. Вишневского, расположенной на смежной территории с границей исторического поселения регионального значения города Казани, возможности сохранения архитектурно-исторических ансамблей в условиях реализации точечных инвестиционных проектов по применению энергоэффективных технологий на этапе эксплуатации жилых домов советского периода 1960–1980 гг., новой застройки (конец XX – начало XXI вв.), а также и оценим перспективы роста рынка повышения энергоэффективности жилых домов и массовых проектов на основе инновационных интеллектуальных технологий.

Исследуемая ул. Вишневского в 1948 г. переименована в честь хирурга и ученого Александра

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

Васильевича Вишневского, создателя Казанской медицинской школы хирургии военных повреждений и гнойных процессов, автора простых и эффективных методов лечения, использовавшихся в годы Великой Отечественной войны. Также он изобрел различные способы местной анестезии, виды новокаиновой блокады и методику их применения в комплексе с масляно-бальзамическим средством для заживления ран и ожогов — мазью Вишневского (линимент бальзамический (1927)).

Прежнее название улицы — Первая академическая — было дано в честь исторической Академической слободы г. Казани. Академическая слобода образовалась в XIX в. в результате строительства Духовной академии, застраивалась в начале улицы каменными домами, а затем — одно- и двухэтажными деревянными домами, в которых жила богема (поэт В. Хлебников) и городская интеллигенция (рис. 1, *a*).

Ул. Вишневского частично формирует границу исторического поселения регионального значения г. Казань (рис. 1, *b*, отрезки 1 и 2) и находится на смежных с ней территориях (см. рис. 1, *b*, отрезки 2 и 3), которые застроены кварталами советской застройки 1960–1980 гг. и кварталами новой застройки (конец XX – начало XXI вв.). Улица образует единый архитектурно-исторический ансамбль, является ценным средовым объектом городского ландшафта.

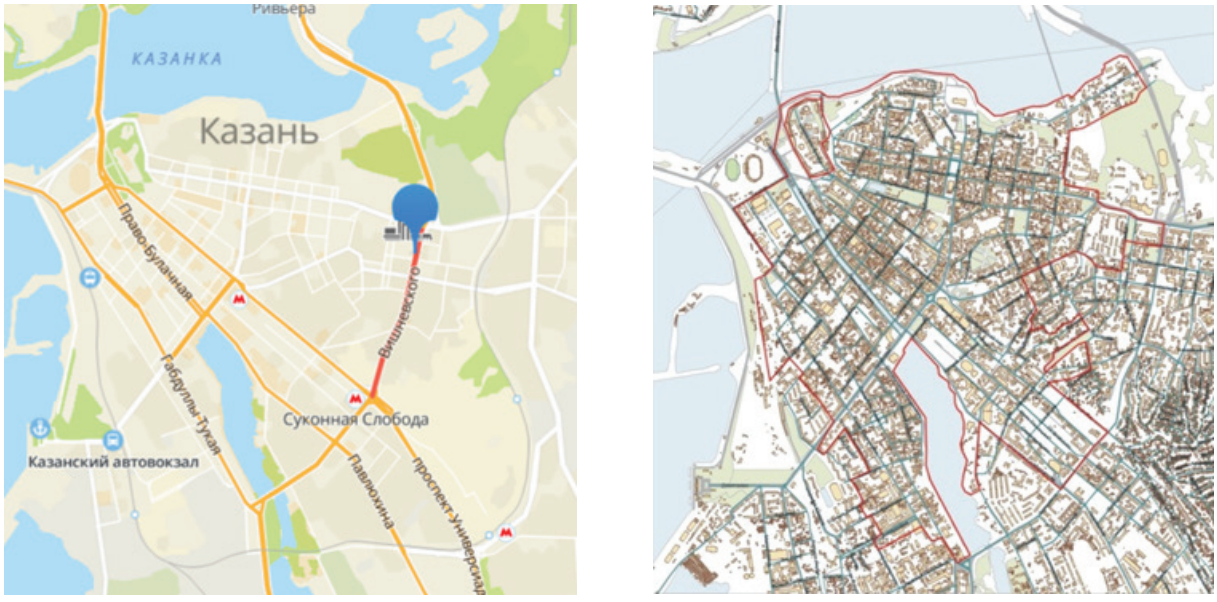
3.1. Анализ спроса со стороны домохозяйств на энергоэффективный ремонт жилых зданий советского периода (1960–1980 гг.) и современной застройки на смежной территории, расположенной на границе исторического поселения регионального значения г. Казань

В исследовании рассмотрены жилые дома единого архитектурного ансамбля ул. Вишневского и реализованные инвестиционные проекты повышения их энергоэффективности, проведенные частной эксплуатирующей фирмой. Обследованные объекты представлены на рис. 2, 3.

3.1.1. Этап строительства (модерации). Частные инвестиции нового застройщика в дополнительное утепление стен фасадов многоквартирного дома

3.1.1.1. Модерация недостроенного объекта: дополнительное внешнее утепление фасада в дополнение к внутреннему утеплению

Рассмотрим инвестиции нового застройщика на этапе строительства (модерации) в ходе достройки многоквартирного дома. Первоначально строительство начато в 2003 г. другим застройщиком, проходящим сейчас процедуру банкротства. В возведенном здании проведено внутреннее утепление стен. Архитектурное решение в проекте



a *b*

Рис. 1. Улица Вишневского в г. Казань: *a* — местоположение ул. Вишневского на карте Казани; *b* — карта-схема границ территории исторического поселения регионального значения г. Казань (источник: 2 ГИС; Приказ Министерства культуры РТ № 218 од от 13.03.2007 «Об утверждении границ территории, предмета охраны и требований к градостроительным регламентам в границах территории исторического поселения регионального значения г. Казань» в актуальной редакции)

Fig. 1. Vishnevsky st., Kazan: *a* — Vishnevsky street on the map of Kazan; *b* — map-map of the territory of the historical settlement of regional significance of Kazan (Source: 2 GIS; Order of the Ministry of Culture 218 of 13 March 2007 On approval of territorial boundaries, subject of protection and requirements for town planning regulations within the borders)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

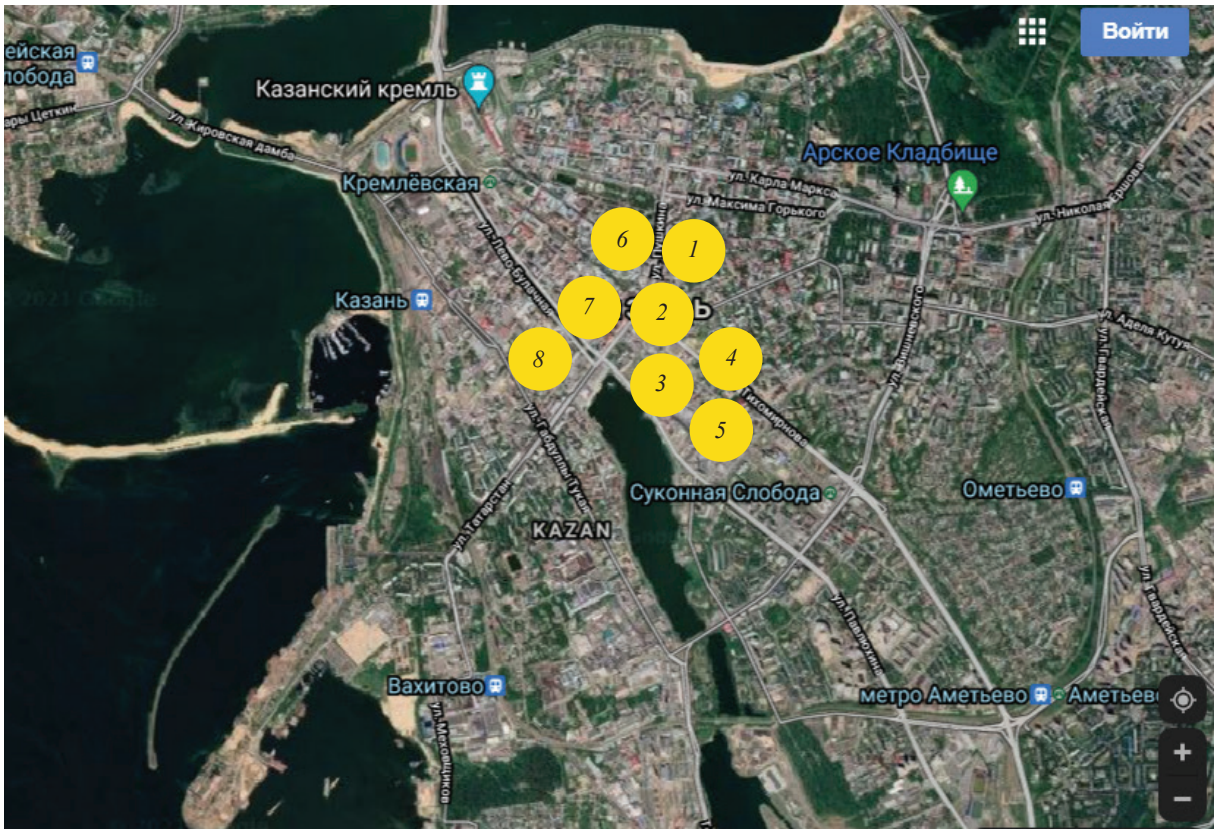


Рис. 2. Место натурных обследований и фотофиксации результатов инвестиционных проектов повышения энергоэффективности многоквартирных жилых домов на смежных территориях, расположенных на границе исторического поселения регионального значения г. Казань по адресам: *1* — ул. Достоевского, д. 57; *2* — ул. Вишневского, д. 53; *3* — ул. Вишневского, д. 55; *4* — ул. Рабочей молодежи, д. 22; *5* — ул. Центральная, д. 39, корп. 2; *6* — ул. Вишневского, д. 14; *7* — ул. Вишневского, д. 14; *8* — ул. Калинина, д. 60 (источник: исследование авторов)

Fig. 2. Place of field surveys and photographs of the results of investment projects to improve the energy efficiency of apartment buildings in adjacent territories located on the border of the historical settlement of regional significance in Kazan at the addresses: *1* — 57 Dostoevsky st.; *2* — 53 Vishnevsky st.; *3* — 55 Vishnevsky st.; *4* — 22 Rabochey molodezhi st.; *5* — 39, bldg. 2, Centralnaya st.; *6* —14 Vishnevsky st.; *7* — 14 Vishnevsky st.; *8* — 60 Kalinina st. (source: research by the authors)



Рис. 3. Ансамбль жилых зданий советского периода (1960–1980 гг.) и современной застройки на ул. Вишневского на смежной территории с границей исторического поселения регионального значения г. Казань (источник: исследование авторов)

Fig. 3. An ensemble of residential buildings of the Soviet period (1960–1980) and modern buildings on Vishnevskogo street on an adjacent territory with the border of the historical settlement of regional significance in Kazan (source: research by the authors)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

модерации — дополнительно с внешней стороны ограждающей конструкции размещен утеплитель (рис. 4).

На рынке недвижимости Казани на 30.03.2021 предложение о продаже трехкомнатных квартир площадью 86 м² в этом доме составляет 122 тыс. руб. за м².

3.1.2. Этап эксплуатации. Частные инвестиции эксплуатирующей фирмы по утеплению стен фасадов многоквартирных домов жилых зданий советского периода (1960–1980 гг.) и современной застройки

3.1.2.1. Комплексное решение по ремонту фасада — почти полное утепление фасада.

Инвестиции эксплуатирующей компании на этапе эксплуатации дома произведены в ходе ремонта (рис. 5).

В жилом доме проведены работы по восстановлению теплозащиты и теплоизоляции стен, утеплен фасад, выполнена отделка с некоторыми эстетическими дефектами: не проведено утепление лоджий, мест прокладки инженерных сетей, что нарушает единство фасада дома (рис. 6).



Рис. 4. Модерация недостроенного жилого дома новым застройщиком и проведение работ по дополнительному внешнему утеплению фасада в дополнение к внутреннему утеплению стен и ограждающих конструкций. Дом расположен по адресу: г. Казань, ул. Достоевского, д. 57 (источник: исследование авторов)

Fig. 4. Moderation of an unfinished residential building by a new developer and work on additional external insulation of the facade in addition to internal insulation of walls and enclosing structures. The house is located at: 57 Dostoevsky st., Kazan (source: research by the authors)



Рис. 5. Комплексное решение по ремонту фасада. Жилой дом по адресу: г. Казань, ул. Вишневского, д. 53 (источник: исследование авторов)

Fig. 5. Complex solution for the renovation of the facade. Residential building at the address: 53 Vishnevsky st., Kazan (source: research by the authors)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021



a *b*

Рис. 6. Эстетические дефекты комплексного решения по ремонту фасада жилого дома по адресу: Казань, ул. Вишневского, д. 53 — отсутствие утепления лоджий (*a*) и мест прокладки инженерных сетей (*b*) (источник: исследование авторов)

Fig. 6. Aesthetic defects of the complex solution for the repair of the facade of a residential building at the address: 53 Vishnevskogo st., Kazan — lack of insulation of loggias (*a*) and places for laying engineering networks (*b*) (source: research by the authors)

3.1.2.2. Точечное решение по ремонту — утепление фасада только одной квартиры (герметизация стыков)

Инвестиции эксплуатирующей фирмы на этапе эксплуатации дома произведены в ходе ремонта по восстановлению теплозащиты и повышению теплоизоляции стен одной квартиры по герметизации стыков декоративных элементов фасада (рис. 7).

3.1.2.3. Торцевое решение при ремонте фасада — утепление северного фасада или утепление северного фасада и угловых квартир

Инвестиции эксплуатирующей фирмы произведены на этапе эксплуатации дома в ходе ремонта торца жилого дома при ремонте фасада и угловых квартир (рис. 8).

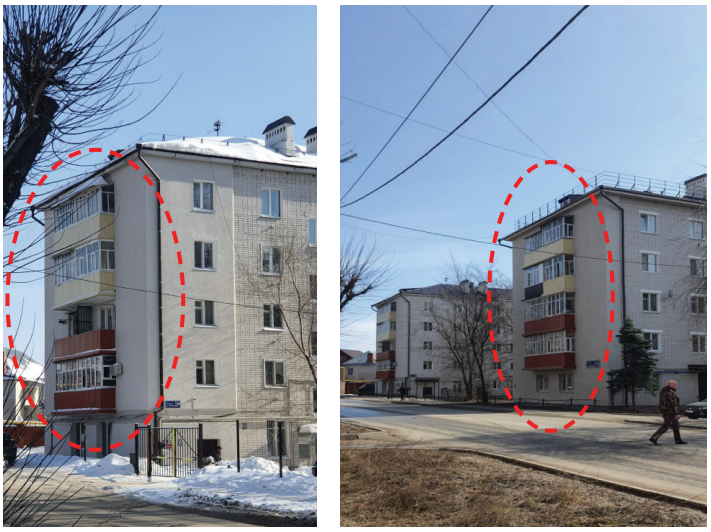
Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что жители домов проявляют активный спрос на проведение энергоэффективного ремонта жилых зданий советского периода (1960–1980 гг.) и современной застройки на смежной территории с границей исторического поселения регионального значения г. Казань. Предложение эксплуатирующей фирмы ограничивается техническими работами, эстетические результаты проведенных ремонтов фасадов лишены



Рис. 7. Точечное решение по ремонту — утепление фасада только одной квартиры (герметизация стыков) жилого дома по адресу: Казань, ул. Вишневского, д. 55 (источник: исследование авторов)

Fig. 7. Spot solution for repair — insulation of the facade of only one apartment (sealing of joints) of a residential building at the address: 55 Vishnevsky st., Kazan (source: research by the authors)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021



a *b*

Рис. 8. Утепление северного фасада и угловых квартир. Жилые дома по адресу: Казань, ул. Центральная, д. 39, корп. 2; ул. Рабочей молодежи, д. 22: *a* — северного фасада и угловых квартир; *b* — только северного фасада (источник: исследование авторов)

Fig. 8. Insulation of the northern facade and corner apartments. Residential buildings at the address: 39, bldg. 2, Centralnaya st., Kazan; 22 Rabochey molodezhi st.: *a* — northern facade and corner apartments; *b* — north facade only (source: authors' research)

художественной составляющей, имеют утилитарный и фрагментарный характер, что позволяет фирме минимизировать затраты по инвестиционным проектам.

3.2. Анализ экстерналий, возникающих в результате реализации стихийных инвестиционных проектов и проведения ремонтных работ эксплуатирующей фирмой

3.2.1. Этап эксплуатации. Частные инвестиции домохозяйств по утеплению стен фасадов многоквартирного дома

3.2.1.1. Стихийная реконструкция: технические и эстетические дефекты фасада жилого дома

На этапе строительства фирмой-застройщиком реализована концепция «сэндвич-панель», утеплитель размещен внутри ограждающих конструкций жилого дома (рис. 9).

На этапе эксплуатации жилого дома собственниками квартир были проведены несогласованные реконструкции, общее собрание по согласованию реконструкции с остальными собственниками не проводилось, согласие всех собственников не получено.



a *b*

Рис. 9. Вид на фасады жилого дома на смежной территории с границей исторического поселения города Казани и результаты стихийной реконструкции жилого дома собственниками: *a* — вид на главный фасад со стороны ул. Вишневского; *b* — вид на дворовой фасад со стороны ул. Калинина (источник: исследование авторов)

Fig. 9. View of the facades of a residential building on the adjacent territory with the border of the historical settlement of the city of Kazan and the results of the spontaneous reconstruction of the residential building by the owners: *a* — view of the main facade from the side of Vishnevsky street; *b* — view of the courtyard facade from Kalinin street (source: research by the authors)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

Следует отметить технические и эстетические последствия стихийной реконструкции, повлиявшие на внешний вид и внутреннее состояние жилого дома:

- постройка новых объектов на плоской крыше;
- присоединение крыши к квартирам и создание террас, застекленных пространств и пр.;
- нарушение эксплуатации технического этажа и крыши дома;
- присоединение лоджий к квартирам;
- нарушение проектной расстекловки, включая изменение проектного коричневого цвета оконных переплетов;
- нарушение цветовой гаммы кирпичной кладки в отклонение от проектного решения фасада дома.

Произошла частичная потеря энергоэффективности ограждающих конструкций жилого дома, появились жалобы жильцов на низкие температуры в квартирах и промерзание стен, утрачена эстетичность фасада жилого дома [29, 30] (рис. 10).

На рынке недвижимости Казани на 30.03.2021 предложение о продаже трехкомнатных квартир площадью 88 м^2 в этом доме составляет 104 тыс. руб. за м^2, что на 16 % меньше, чем в аналогичном объекте этого же застройщика до проекта модерации по адресу: ул. Достоевского, д. 57.

3.2.2. Этап эксплуатации. Частные инвестиции эксплуатирующей фирмы по утеплению стен фасадов многоквартирных домов

3.2.2.1. Фрагментарное решение — утепление части фасада около торца

Инвестиции эксплуатирующей фирмы произведены на этапе эксплуатации дома в ходе ремонта жилого дома, проведено только утепление части фасада около торца (рис. 11).

3.2.2.2. Торцевое решение при ремонте фасада и одной угловой квартиры

Инвестиции эксплуатирующей фирмы произведены на этапе эксплуатации дома в ходе ремонта, проведено утепление только западного фасада и одной угловой квартиры (рис. 12).

Анализ примеров рационального поведения домохозяйств и фирм по созданию комфортных условий в квартирах жилых домов в результате реализации стихийных инвестиционных проектов эксплуатирующей фирмой по проведению утепления стен фасадов зданий или инвестиций собственников квартир выявил следующие отрицательные экстерналии:

- эстетические дефекты фасадов жилых домов: фрагментарные решения, которые нарушают проектные и исторические фасады архитектурно-исторического ансамбля улицы; нарушение проектной расстекловки, включая изменение проектного коричневого цвета оконных переплетов; нарушение цветовой гаммы кирпичной кладки; отклонение от проектного решения фасада дома;
- технические дефекты: постройка новых объектов на плоской крыше, создание террас, застекленных пространств и пр.; нарушение эксплуатации технического этажа и крыши дома; потеря энергоэффективности ограждающих конструкций жилого дома;
- правовые коллизии: присоединение общедолевого имущества крыши к квартирам и ограничение доступа к общему имуществу, в том числе для



a *b* *c*

Рис. 10. Внешние эстетические и внутренние технические дефекты жилого дома, ставшие результатами стихийной реконструкции: *a* — балкона; *b* — новые объекты на плоской крыше; *c* — фиксация теплопотерь от некачественного внутреннего утепления стен и присоединенных лоджий (источник: исследование авторов, термограмма авторов)

Fig. 10. External aesthetic and internal technical defects of a residential building resulting from spontaneous reconstruction: *a* — balcony; *b* — new objects on the flat roof; *c* — fixing heat loss from poor-quality internal insulation of walls and attached loggias (source: research by the authors, thermogram of the authors)



a *b*

Рис. 11. Фрагментарное решение по ремонту — утепление части фасада около торца. Жилой дом по адресу: Казань, ул. Вишневского, д. 4: *a* — вид на южный фасад, утепление не производилось; *b* — вид на восточный фасад, утепление стен угловых квартир (источник: исследование авторов)

Fig. 11. A fragmentary solution for the repair — insulation of a part of the facade near the end. Residential building at the address: Kazan, st. Vishnevskogo, 4: *a* — view of the southern facade, insulation was not carried out; *b* — view of the eastern facade, wall insulation of corner apartments (source: research by the authors)

технического обслуживания; присоединение лоджий к квартирам.

3.3. Анализ экономических проблем нерациональных расходов домохозяйств на отопление квартир в жилых домах с высоким потреблением энергии, построенных в советский период (1960–1980 гг.), и современной застройки

В исследовании выявлено, что поведение домохозяйств на рассматриваемых объектах характеризуется ростом спроса на повышение энергоэффективности, снижение энергопотребления как новых домов на этапе строительства, так и старого жилого фонда на этапе эксплуатации.

В сегменте нового строительства жилья девелоперские фирмы предлагают различные энергоэффективные решения, что проявляется на этапе строительства при разработке инвестиционного проекта, в исключительных случаях — при модерации проблемных объектов с доработкой первоначального архитектурного проекта.

Растет спрос на повышение энергоэффективности жилых зданий в сегменте старого жилого фонда.



a *b*

Рис. 12. Торцевое решение при ремонте фасада и одной угловой квартиры — утепление только западного фасада и одной угловой квартиры. Жилой дом по адресу: Казань, ул. Вишневского, д. 14: *a* — утепление западного фасада; *b* — утепление только одной угловой квартиры на третьем этаже (источник: исследование авторов)

Fig. 12. End solution for the renovation of the facade and one corner apartment — insulation of only the western facade and one corner apartment. Residential building at the address: 14 Vishnevsky st., Kazan: *a* — insulation of the western facade; *b* — insulation of only one corner apartment on the third floor (source: research by the authors)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

Однако со стороны владельцев квартир требуются немалые усилия по реализации права на энергоэффективные решения и финансирование со стороны эксплуатирующей фирмы при ремонте зданий, которые могут быть точечными, фрагментарными и комплексными (не всегда выразительными и с невысокой художественной ценностью).

Хорошо известно, что, согласно Жилищному кодексу РФ, ремонт фасада относится к работам по капитальному ремонту общего имущества дома. Если необходимо утепление отдельного участка, управляющая организация восстанавливает теплозащиту только на выявленном участке. В Санкт-Петербурге региональные власти к ремонту стен относят утепление фасада.

В проведенном исследовании выявлено, что в поведении эксплуатирующей фирмы отмечается тенденция низкобюджетных точеных инвестиций в энергосберегающие инвестиционные проекты, выполненные по требованиям настойчивых собственников квартир и согласно нормативных правовых документов.

Низкобюджетные проекты позволяют эксплуатирующей фирме вести себя рационально и как коммерческой организации минимизировать издержки на этапе эксплуатации объектов недвижимости, не проводить массовую комплексную работу по отдельным жилым зданиям и по архитектурному ансамблю улицы в целом.

Бремя неоправданных расходов по оплате излишне потребляемых ресурсов при этом несут домохозяйства, которые тем не менее становятся все настойчивее в реализации своих прав на рациональное использование ресурсов (как природных, так и денежных).

В результате натурного обследования и проведенного анализа инвестиционных проектов утепления фасадов жилых зданий советского периода (1960–1980 гг.) и современной застройки на смежной территории с границей исторического поселения регионального значения г. Казань на основе перспективных технологий выявлены следующие тенденции развития рынка энергоэффективных жилых зданий в течение жизненного цикла объектов:

1) на этапе строительства:

• разработка архитектурных проектов по повышению энергоэффективности зданий и привлекательности фасадов для будущих покупателей, проект модерации недостроенного объекта: дополнительное внешнее утепление фасада в дополнение к внутреннему утеплению стен по первоначальному проекту;

• высокая стоимость 1 м^2 квартир в энергоэффективных домах по сравнению с аналогами в том же районе;

2) на этапе эксплуатации:

• появление активных собственников, добившихся проведения энергоэффективного ремонта в той или иной мере от эксплуатирующей фирмы;

• наличие решений по утеплению фасадов разной степени фрагментарности, ни одно из которых не стало украшением ул. Вишневского:

• комплексное решение по ремонту фасада — почти полное утепление фасада;

• точечное решение по ремонту — утепление фасада только одной квартиры (герметизация стыков);

• торцевое решение при ремонте фасада — утепление северного фасада;

• торцевое решение при ремонте фасада и угловых квартир — утепление северного фасада и угловых квартир;

• стихийная реконструкция — технические и эстетические дефекты фасада жилого дома;

• фрагментарное решение — утепление фасада около торца;

• торцевое решение при ремонте фасада и одной угловой квартиры — утепление только западного фасада и одной угловой квартиры;

• снижение стоимости 1 м^2 в зданиях без санации по сравнению с аналогами на той же улице на 16 %.

Выявлены отрицательные экстерналии стихийных работ эксплуатирующей фирмы и реконструкции собственников: 1) неэстетичные фасадные решения после проведения фрагментарного утепления стен фасадов, особенно заметные на смежной территории границы исторического поселения; 2) недостижение максимизации общественного благосостояния за счет создания для всех жителей возможности рационального потребления природных ресурсов и проживания в комфортных условиях в квартирах жилых домов на всех этапах жизненного цикла, особенно на этапе эксплуатации объектов недвижимости.

В целом можно отметить положительные экстерналии: настойчивые собственники смогли повысить качество своих квартир, получить комфортные условия проживания при низких затратах на обслуживание квартир.

3.4. Анализ эстетических проблем проведения ремонта работ в жилых домах, построенных в советский период (1960–1980 гг.), и современной застройки: стилизованные мотивы тюльпана и гвоздики

Хорошо известны традиционные меры государственной политики и законодательства в области охраны памятников истории и культуры, которые реализуются в российской практике.

Дискуссионными остаются вопросы буферной зоны и изменения исторических фасадов в ре-

зультате повышения энергоэффективности жилых зданий и проведенных ремонтных работ эксплуатирующей организацией на смежной территории с границей исторического поселения, в том числе красивых ансамблей улиц с особенными декоративными элементами.

Рассмотрим примеры сохранившихся исторических декоративных элементов фасадов жилых зданий советского периода (1960–1980 гг.) и современной застройки ул. Вишневского на смежной территории с границей исторического поселения регионального значения г. Казани.

В отличие от декора домов типовых серий, которые возводились в СССР в период массовой застройки городов, в Казани, на заводе железобетонных конструкций в советский период в условиях экономии ресурсов и минимального использования архитектурного декора были разработаны уникальные по художественной ценности и выразительности декоративные элементы фасадов жилых зданий советского периода [31] — плиты ограждения лоджий с использованием стилизованного булгарского цветочно-растительного орнамента (мотивы тюльпана и гвоздики), которые встречаются в традиционном искусстве волжских булгар [33] (рис. 13).

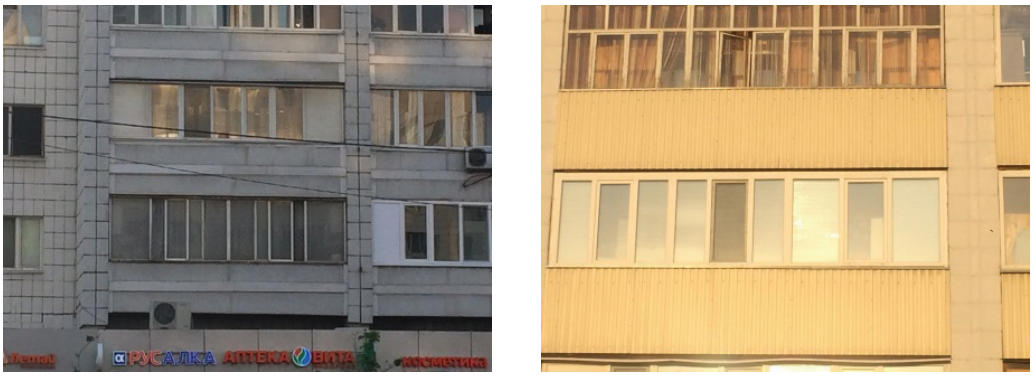
Рассмотрим результаты проведения утилитарных и практичных ремонтных работ эксплуатирующей компанией по утеплению и ремонту фасадов зданий на ул. Вишневского (рис. 14).



a *b*

Рис. 13. Фрагменты исторических декоративных элементов фасадов — плиты ограждения лоджии с использованием стилизованного цветочно-растительного орнамента. Жилые дома по адресу: Казань, ул. Вишневского, д. 55, 57: *a* — мотив тюльпана; *b* — мотив гвоздики (источник: исследование авторов)

Fig. 13. Fragments of historical decorative elements of the facades — slabs of the fence of the loggia with the use of stylized floral and floral ornament. Residential buildings at the address: 55, 57 Vishnevsky st., Kazan: *a* — tulip motif; *b* — carnation motif (source: research by the authors)



a *b*

Рис. 14. Фрагменты фасадов зданий после ремонта декоративных элементов — плит ограждения лоджий. Жилой дом по адресу: Казань, ул. Вишневского, д. 14, 53: *a* — металлическими пластинами закрыто отверстие между плитами, проведена покраска типовой гладкой поверхности плиты ограждения лоджии; *b* — установлены цветные металлические ограждения поверх исторического декора (источник: исследование авторов)

Fig. 14. Fragments of building facades after the repair of decorative elements — loggia fencing slabs. Residential building at the address: 14, 53 Vishnevskogo st., Kazan: *a* — the hole between the plates is closed with metal plates, a typical smooth surface of the loggia fence plate was painted; *b* — colored metal railings were installed on top of the historic decor (source: research by the authors)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

Рассматривая в качестве опекаемого блага ценность средовой застройки, художественные архитектурные особенности ансамбля городской улицы как единого целого на смежной территории с границей исторической части города, возможно в перспективе сохранить исторический городской ландшафт, используя механизм буферной зоны границ исторического поселения, который позволит сохранить масштаб, объем, стиль, декоративные элементы зданий улиц-границ и смежных территорий с границами исторического поселения, первоначально объединенных авторами проекта планировки улицы в единый архитектурный ансамбль.

Институт общественной опеки под эгидой государственных органов власти или региональных органов власти может регулировать:

• инвестиции в границах исторических поселений на всем жизненном цикле городской среды;

• сохранение исторических предметов прикладного искусства (декоративных элементов фасадов проектов) при реализации проектов по повышению энергоэффективности зданий советского периода в перспективе массовых инвестиционных решений, основанных на экономическом механизме поощрения государством добросовестных жителей и эксплуатирующих фирм, которые не разрушают историческое и культурное наследие в буферной зоне исторической части города (рис. 15).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спрос на рынке энергоэффективного строительства и эксплуатации многоквартирных жилых домов порождает экстерналии и провалы рынка, возникающие при реализации частной эксплуатирующей компанией инвестиционных проек-



a *b* *c* *d*

Рис. 15. Вид на ансамбль зданий на ул. Вишневского на смежной территории с историческим поселением регионального значения г. Казань: *a* — квартал новой застройки (конец XX – начало XXI вв.); *b–d* — архитектурный ансамбль квартала застройки советского периода (1960–1980 гг.) (источник: исследование авторов)

Fig. 15. View of the ensemble of buildings on the street. Vishnevsky in the adjacent territory with a historical settlement of regional significance in Kazan: *a* — a block of new buildings (late XX — early XXI centuries); *b–d* — the architectural ensemble of the building block of the Soviet period (1960–1980) (source: research by the authors)

тов по повышению энергоэффективности жилых зданий старого жилого фонда, расположенного на смежной территории с границей исторического поселения. Анализ показал:

1) активный спрос со стороны домохозяйств на энергоэффективный капитальный ремонт зданий советского периода (1960–1980 гг.) и современной застройки, расположенных на смежной территории с границей исторического поселения регионального значения г. Казань. Предложения эксплуатирующей фирмы ограничиваются техническими работами, эстетические результаты проведенных ремонтов фасадов лишены художественной составляющей, имеют утилитарный и фрагментарный характер, что позволяет фирме минимизировать затраты по инвестиционным проектам;

2) экономические проблемы нерациональных расходов домохозяйств на отопление и кондиционирование квартир в жилых домах с высоким потреблением энергии, построенных в советский период (1960–1980 гг.), и современной застройки:

• эстетические дефекты фасадов жилых домов: фрагментарные решения, которые нарушают проектные и исторические фасады архитектурно-исторического ансамбля улицы; нарушение проектной расстекловки, включая изменение проектного коричневого цвета оконных переплетов; нарушение колористического решения фасада — отклонение цвета кирпичной кладки от проектного решения фасада дома;

• технические дефекты: постройка новых объектов на плоской крыше, создание террас, застекленных пространств и пр.; нарушение эксплуатации технического этажа и крыши дома; потеря энергоэффективности ограждающих конструкций жилого дома;

• правовые коллизии: присоединение общедолевого имущества крыши к квартирам и ограничение доступа к общему имуществу, в том числе для технического обслуживания; присоединение лоджий к квартирам;

3) экстерналии, возникающие в результате реализации стихийных инвестиционных проектов и проведения ремонтных работ эксплуатирующей фирмой, в частности, по утеплению ограждающих конструкций фасадов зданий:

• отрицательные экстерналии стихийных работ эксплуатирующей фирмы и реконструкции собственников: неэстетичные фасадные решения после проведения фрагментарного утепления стен фасадов, особенно заметные на смежной территории с границей исторического поселения; недостижение максимизации общественного благосостояния за счет создания возможности для всех жителей рационального потребления природных ресурсов и проживания в комфортных условиях в квартирах жилых домов на всех этапах жизненного цикла, особенно на этапе эксплуатации объектов недвижимости;

• положительные экстерналии: настойчивые собственники смогли повысить качество своих квартир, получить комфортные условия проживания при низких затратах на обслуживание квартир.

Создание института общественной опеки как экономического механизма государственного регулирования жилищной сферы общественного сектора экономики и защиты буферной зоны границы исторического поселения будет способствовать сохранению архитектурно-строительных традиций и позволит:

1) бережно сохранить историко-художественную ценность архитектурных ансамблей города на протяжении всего жизненного цикла объектов городской застройки;

• сберечь выразительность и самобытность ансамблей города;

• снизить долю паразитарной архитектуры, возникающей на эксплуатационном этапе жизненного цикла объектов недвижимости;

2) получить экономический эффект в результате цифровизации экономики, применения инноваций в жилищной сфере общественного сектора экономики, в том числе на примере реализации государственной политики энергоэффективности и энергосбережения:

• обеспечить рациональное низкое потребление энергии в жилых зданиях старого жилого фонда городов и повысить комфорт квартир и жилых домов;

• увеличить туристический поток за счет расширения привлекательности для туристов вновь созданных точек притяжения в городе и тем самым повысить налоговые поступления в городской бюджет за счет роста туристической отрасли;

• сделать историческую часть города инвестиционно привлекательной за счет повышения стоимости объектов недвижимости (ревалоризация) и развития малого и среднего бизнеса, что создаст условия для реализации рентабельных реставрационно-восстановительных инвестиционных проектов исторической части города;

• создать условия максимизации общественного благосостояния и гармоничного культурного и экономического развития региона.

В будущих исследованиях мы хотели бы изучить инвестиционные проекты развития городской инфраструктуры, сравнить и обобщить мнения экспертов отрасли и подготовить новое более расширенное исследование. Мы понимаем ограниченность нашего исследования и тем не менее постарались привлечь лучших архитекторов, практиков регионального строительного рынка и признательны им за уделенное время.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

ЛИТЕРАТУРА

1. *Баденко В.Л., Федотов А.А., Ядыкин В.К., Баденко В.Л.* Цифровые двойники сложных технических систем в индустрии 4.0: базовые подходы // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2020. Т. 13. № 1. С. 20–30. DOI: 10.18721/JE.13102

2. Всемирное культурное наследие / под ред. В.И. Фокина, Н.М. Боголюбовой. СПб. : Изд-во СПбГУ, 2015. 368 с.

3. *Боголюбова Н.М., Николаева Ю.В.* В поисках эффективной политики охраны культурного наследия: европейский опыт // Евразийский союз ученых (ЕСУ). 2018. № 4 (49). С. 51–53.

4. *Pigou A.* The Economics of Welfare. London : MacMillan, 1920.

5. *Масгрейв Р.А., Масгрейв П.Б.* Государственные финансы: теория и практика. М. : Бизнес Атлас. 2009. 716 с.

6. *Baumol W.J., Bowen W.G.* Performing Arts — The Economic Dilemma. The MIT Press, 1968. 598 p.

7. *Рубинштейн А.* К теории опекаемых благ. Неэффективные и эффективные равновесия // Вопросы экономики. 2011. № 3. С. 65–87. DOI: 10.32609/0042-8736-2011-3-65-87

8. *Bolshakov N., Badenko V., Yadykin V., Celani A.* As-built BIM in real estate management: the change of paradigm in digital transformation of economy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Vol. 940. No. 1. P. 012017.

9. *Kornberger M., Pflueger D., Mouritsen J.* Evaluative Infrastructures: Accounting for Platform Organization // Accounting. Organizations and Society. 2017. Vol. 60. Pp. 79–95. DOI: 10.1016/j.aos.2017.05.002

10. *Bakhareva O., Azhimov T., Azhimova L., Marfina L., Khuzagaripov A.* The classification of transaction costs: the innovation in the construction industry based on building information modeling a case study of multilingual schools // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 890. Pp. 012118. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012118

11. *Yablonsky S.A.* Multi-sided platforms: current state and future research // Российский журнал менеджмента. 2020. Vol. 17 (4). Pp. 519–546. DOI: 10.21638/spbu18.2019.407

12. *Файст В.* Основные положения по проектированию пассивных домов. М. : Изд-во АСВ, 2008. 144 с.

13. *Šijanec Zavrl M., Stegnar G.* Comparison of simulated and monitored energy performance indicators on NZEB case study eco silver house // Procedia Environmental Sciences. 2017. Vol. 38. Pp. 52–59. DOI: 10.1016/j.proenv.2017.03.074

14. *Шевченко Э.А.* Градостроительные проблемы сохранения историко-культурного ресурса России // Academia. Архитектура и строительство. 2012. № 1. С. 99–104. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/gradostroitelnye-problemy-sohraneniya-istoriko-kulturnogo-resursa-rossii.

15. *Щенков А.С.* Реконструкция исторических городов : учеб пособие: в 2-х ч. Основы реконструкции исторических городов. Исторический опыт развития архитектурного ансамбля. М. : Памятники исторической мысли, 2013. 420 с.

16. *Тренин А.Б.* Разработка историко-архитектурных опорных планов и проектов зон охраны памятников истории и культуры исторических населенных пунктов : методические рекомендации. М., 1990. 38 с.

17. *Касьянов В.Ф.* Реконструкция жилой застройки городов. М. : Изд-во АСВ, 2005. 224 с.

18. *Шевченко Э.А., Никифоров А.А., Лукашев А.В., Добаева Т.П., Никитина Е.А., Пехтер Е.Э. и др.* Методические рекомендации оценки историко-культурной ценности поселения. Применение критериев историко-культурной ценности поселения в оценке недвижимости, расположенной в границах исторического поселения. СПб. : Зодчий, 2014. 264 с.

19. *Вавилонская Т.В.* Методологический аспект сохранения и обновления архитектурно-исторической среды квартала (на примере г.о. Самары) // Вестник МГСУ. 2012. № 1. С. 6–11. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.1.6-11

20. *Шевченко Э.А., Седлецкая М.В.* Современная практика установления границ и предмета охраны исторических поселений // Вестник. Зодчий. 21 век. 2016. № 2-2(59). С. 10–21.

21. *Панфилов А.Н.* Правовые аспекты осуществления органами местного самоуправления особого регулирования градостроительной деятельности в исторических поселениях в Российской Федерации // Проблемы гражданского права и процесса : сб. науч. ст. Гродно, 2016. С. 234–248.

22. *Bolshakov N., Badenko V., Celani A.* Integration of territorial analysis methods in site selection on the example of Saint Petersburg // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018. Vol. 365. No. 2. P. 022052. DOI:10.1088/1757-899X/365/2/022052

23. *Губинская К.Ю.* Морфология исторической городской среды Выборга // Инновации и инвестиции. 2018. № 1. С. 189–196.

24. *Кубецкая Л.И., Кудрявцева Н.О.* Историко-генетические модели поселения и ценностное зонирование территорий // Градостроительство. 2017. № 3(49). С. 9–23.

25. *Шиглиц М.С., Лаврухин А.Н.* К вопросу об историко-культурном потенциале Санкт-Петербургской агломерации на примере Сестрорецкого оружейного завода // Недвижимость: экономика, управление. 2019. № 2. С. 61–66. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=41187215

26. *Семенцов С.В.* Градостроительное развитие территорий Приневья до основания Санкт-Петербурга: освоение зоны дельты Невы в XVII веке // Вестник Санкт-Петербургского университета. Искусствоведение. 2015. № 2. С. 110–125.

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

28. *Лащенко С.В., Грозовский Б.В.* Поможет ли «историческое поселение» сохранить старый центр Самары // Innovative project. 2019. Т. 4. № 10. С. 28–46. DOI: 10.17673/IP.2019.4.10.3

29. Bakhareva O.V. Strategic planning of infrastructure development: BIM and intelligent building // Journal of Advanced Research in Law and Economics. 2019. Vol. 10. No. 8 (46). Pp. 2262–2270. DOI: 10.14505/jarle.v10.8(46).06

30. Bakhareva O.V., Kordonchik D.M. Investment in preservation and development of regional cultural heritage: a library of BIM elements reprenting national architectural and urban-planning landmarks // Architecture and Engineering. 2019. Vol. 4. No. 3. Pp. 39–48. DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-3-39-48

31. *Гарзавина А.В., Новицкий А.И.* Моя Казань: исторический и архитектурно-художественный облик. Казань : Татарское кн. Издательство, 1984. 192 с.

32. *Валеев Ф.Х.* Татарский народный орнамент. Казань, 2002. С. 54.

Поступила в редакцию 21 июня 2021 г.
Принята в доработанном виде 30 июня 2021 г.
Одобрена для публикации 30 июня 2021 г.

Об авторах: **Ольга Владимировна Бахарева** — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики и информационных технологий; **Казанский государственный аграрный университет (Казанский ГАУ)**; 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 65; РИНЦ ID: 800333; OVBakhareva@mail.ru;

Лилия Ирековна Ажимова — кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики и предпринимательства в строительстве; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)**; 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1; РИНЦ ID: 617173; liliyaazhimova@gmail.com;

Альберто Челани — кандидат технических наук, кафедра архитектуры, застроенной среды и строительной инженерии; **Миланский технический университет**; Италия, 20133, Милан, пл. Леонардо да Винчи, д. 32; alberto.celani@polimi.it;

Николай Сергеевич Большаков — инженер Центра НТИ; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 703137; nikolaybolshakov7@gmail.com.

REFERENCES

1. Badenko V.L., Fedotov A.A., Yadykin V.K., Badenko V.L. Digital twins of complex technical objects in industry 4.0: basic approaches. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 2020; 13:20-30. DOI: 10.18721/JE.13102 (rus.)

2. *World cultural heritage* / Ed. V.I. Fokin, N.M. Bogolyubova. Saint Petersburg, Publishing house of SPbSU, 2015; 368. (rus.)

3. Bogolyubova N.M., Nikolaeva Yu.V. In search of an effective policy for the protection of cultural heritage: European experience. *Eurasian Union of Scientists*. 2018; 4(49):51-53. (rus.).

4. Pigou A. *The Economics of Welfare*. London, MacMillan, 1920.

5. Musgrave R.A., Musgrave P.B. *Public finance: theory and practice*. Moscow, Business Atlas, 2009; 716. (rus.).

6. Baumol W.J., Bowen W.G. *Performing arts — the economic dilemma*. The MIT Press, 1968; 598.

7. Rubinstein A. A theory of patronized goods: inefficient and efficient equilibria. *Voprosy Ekonomiki*. 2011; (3):65-87. DOI: 10.32609/0042-8736-2011-3-65-87 (rus.).

8. Bolshakov N., Badenko V., Yadykin V., Celani A. As-built BIM in real estate management: the change of paradigm in digital transformation of economy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020; 940(1):012017.

9. Kornberger M., Pflueger D., Mouritsen J. Evaluative infrastructures: accounting for platform organization. *Accounting. Organizations and Society*. 2017; 60:79-95. DOI: 10.1016/j.aos.2017.05.002

10. Bakhareva O., Azhimov T., Azhimova L., Marfina L., Khuzagaripov A. The classification of transaction costs: the innovation in the construction industry based on building information modeling. a case study of multilingual schools. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 890:012118. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012118

11. Yablonsky S.A. Multi-sided platforms: current state and future research. *Russian Management Journal*. 2020; 17(4):519-546. DOI: 10.21638/spbu18.2019.407.

12. Feist V. *Basic provisions for the design of passive houses*. Moscow, ASV Publishing House, 2008; 144. (rus.).

13. Šijanec Zavrl M., Stegnar G. Comparison of simulated and monitored energy performance indicators on NZEB case study eco silver house. *Procedia Environmental Sciences*. 2017; 38:52-59. DOI: 10.1016/j.proenv.2017.03.074

14. Shevchenko E.A. The town-planning problems of conservation of the historical and cultural resource of Russia. *Academia. Architecture and construction*. 2012; 1:99-104. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/gradostroitelnye-problemy-sohraneniya-istoriko-kulturnogo-resursa-rossii (rus.).

15. Puppies A.S. *Reconstruction of historic cities : study guide: in 2 parts Fundamentals of the reconstruction of historic cities. Historical experience in the development of an architectural ensemble*. Moscow, Monuments of historical thought, 2013; 420. (rus.).

16. Trenin A.B. *Development of historical and architectural reference plans and projects of zones for the protection of historical and cultural monuments of historical settlements : guidelines*. M., 1990; 38. (rus.).

17. Kasyanov V.F. *Reconstruction of residential buildings in cities*. Moscow, ASV Publishing House, 2005; 224. (rus.).

18. Shevchenko E.A., Nikiforov A.A., Lukashev A.V., Dobaeva T.P., Nikitina E.A., Pekhter E.E. et al. *Methodical recommendations for assessing the historical and cultural value of the settlement. Application of the criteria of the historical and cultural value of a settlement in the assessment of real estate located within the boundaries of a historical settlement*. St. Petersburg, Architect Publ., 2014; 264. (rus.).

19. Vavilonskaya T.V. Methodological aspects of the conservation and updates in architectural and historical environment of a city blocks (for example Samara). *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 1:6-11. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.1.6-11 (rus.).

20. Shevchenko E.A., Sedletskaya M.V. Modern practice of establishing boundaries and the subject of protection of historical settlements. *Bulletin. Architect. 21 century*. 2016; 2-2(59):10-21. (rus.).

21. Panfilov A.N. Legal aspects of the implementation by local governments of special regulation of urban planning activities in historical settlements in the Russian Federation. *Problems of civil law and process : collection of scientific articles*. Grodno, 2016; 234-248. (rus.).

22. Bolshakov N., Badenko V., Celani A. Integration of territorial analysis methods in site selection on the example of Saint Petersburg. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2018; 365(2): 022052. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022052

23. Gubinskaya K.Yu. Morphology of the historical urban environment of Vyborg. *Innovation and investment*. 2018; 1:189-196. (rus.).

24. Kubetskaya L.I., Kudryavtseva N.O. Historical and genetic models of settlement and value zoning of territories. *Urban planning*. 2017; 3(49):9-23. (rus.)

25. Shiglitz M.S., Lavrukhin A.N. To the question of historical and cultural potential of the Saint-Petersburg agglomeration. On the example of the Sestroretsk weapons factory. *Real estate: economics, management*. 2019; 2:61-66. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=41187215 (rus.).

26. Sementsov S.V. Town-planning development of the territories along the Neva river before the foundation of Saint-Petersburg: development of the Neva river estuary areas in the 17th century. *Vestnik of Saint Petersburg University. Arts*. 2015; 2:110-125. (rus.).

27. Shcherbina E.V., Belal A.A. Features of attribution of objects of historical territories of cities destroyed by the war. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2020; 4-5:12-18. DOI: 10.31659/0044-4472-2020-4-5-12-18 (rus.).

28. Lashchenko S.V., Grozovsky B.V. Will the mechanism of preservation help to conserve the old center of Samara. *Innovative project*. 2019; 4(10):28-46. DOI: 10.17673/IP.2019.4.10.3 (rus.).

29. Bakhareva O.V. Strategic planning of infrastructure development: bim and intelligent building. *Journal of Advanced Research in Law and Economics*. 2019; 10:8(46):2262-2270. DOI: 10.14505/jarle.v10.8(46).06

30. Bakhareva O.V., Kordonchik D.M. Investment in preservation and development of regional cultural heritage: a library of BIM elements reprenting national architectural and urban-planning landmarks. *Architecture and Engineering*. 2019; 4(3):39-48. DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-3-39-48

31. Garzavina A.V., Novitsky A.I. *My Kazan: historical, architectural and artistic appearance*. Kazan, Tatar book publishing house, 1984; 192. (rus.).

32. Valeev F.Kh. *Tatar folk ornament*. Kazan, 2002; 54. (rus.).

Received June 21, 2021.
Adopted in revised form on June 30, 2021.
Approved for publication on June 30, 2021.

Bionotes: **Olga V. Bakhareva** — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics and Information Technologies; **Kazan State Agrarian University (KazanSAU)**; 65 Karl Marx st., Kazan, 420015, Russian Federation; ID RISC: 800333; OVBakhareva@mail.ru;

Liliya I. Azhimova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Economics and Entrepreneurship in Construction; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; ID RISC: 617173; liliyaazhimova@gmail.com;

Alberto Celani — Candidate of Economic Sciences, Department of Architecture; **Built Environment and Civil Engineering, Politecnico di Milano**; 32 Leonardo da Vinci, Milan, 20133, Italia; lberto.celani@polimi.it;

Nicolai S. Bolshakov — engineer of the NTI Center; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politekhnicheskaya st., Saint Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC 703137; nikolaybolshakov7@gmail.com.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 16. Выпуск 6, 2021**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 16. Issue 6, 2021**

УДК 628.47:004.94 DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.770-780

Модель изменения гидротехнических характеристик территории полигона твердых промышленных и бытовых отходов

А.А. Ковригин, М.Ю. Слесарев
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Полигон твердых промышленных и бытовых отходов (ТПБО) — источник негативного воздействия на окружающую среду. Накрытый сверху, оснащенный технически инженерными системами по сбору и очистке биогаза полигон ТПБО продолжает оказывать негативное воздействие на подземные и поверхностные воды путем распространения фильтрата. Цель исследования — получение прогнозных сведений изменения гидрогеологических характеристик территории полигона ТПБО «Саларьево», с последующим построением имитационной модели для оценки применения технических решений при рекультивации.

Материалы и методы. Processing Modflow — программное обеспечение, предназначенное для трехмерного моделирования фильтрации и переноса загрязняющих веществ. Исходными данными для построения имитационной модели послужил технический отчет по инженерно-экологическим изысканиям, выполненный АО «МосводоканалНИИпроект» в 2017 г. на территории полигона ТПБО «Саларьево» и в его окрестностях.

Результаты. С применением программного обеспечения Processing Modflow рассмотрены три варианта устройства фильтрационных завес для конкретного полигона ТПБО при рекультивации. Наиболее эффективным техническим решением стало устройство фильтрационных завес с восточной и западной сторон от полигона с учетом сорбирующей функции противофильтрационных завес. На основании полученных результатов можно заключить, что при устройстве противофильтрационных сорбирующих завес с целью предотвращения распространения фильтрата прогнозно удается сократить разницу по распространению в плане до 500 м.

Выводы. При рекультивации полигона ТПБО «Саларьево» рекомендуемым к реализации является вариант с устройством как противофильтрационной завесы на востоке, так и сорбирующей завесы на западе от полигона ТПБО. Предложенное техническое решение позволит сконцентрировать фильтрат внутри полигона и будет препятствовать его распространению.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полигон ТПБО, фильтрат, подземные воды, моделирование, рекультивация полигона, противофильтрационные завесы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Ковригин А.А., Слесарев М.Ю.* Модель изменения гидротехнических характеристик территории полигона твердых промышленных и бытовых отходов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 6. С. 770–780. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.770-780

A change model of the hydraulic characteristics of the territory occupied by the landfill of solid industrial and domestic waste

Artur A. Kovrigin, Mikhail Yu. Slesarev
Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A landfill of solid industrial and domestic waste (LSIDW) is a source of negative impact on the environment. Although landfills have coverings, and they are equipped with engineering systems designated for the capturing and treatment of the biogas, LSIDW landfills still have a negative impact on subsurface and surface waters due to the spread of leachate. The purpose of this work is to obtain predictive data on changes in the hydrogeological characteristics of the territory of Salaryevo landfill, and to develop a simulation model to assess the application of technical solutions in the course of the landfill reclamation.

Materials and methods. Processing Modflow is the software designated for the 3D modeling of filtration and transportation of pollutants. An engineering report based on the engineering and environmental surveys, performed by JSC MosvodokanalNIIproekt in the Salaryevo landfill and its environs in 2017, served as the input data designated for a simulation model.

Results. Processing Modflow software allowed to consider three options of cutoff walls, tailored to this landfill. The installation of cutoff walls on the east and west sides of the landfill, to be performed with regard for the sorption function of the cutoff walls, is the most effective solution. The results have shown that the cutoff walls, installed to prevent the leachate from

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • **Том 16. Выпуск 6, 2021**
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • **Volume 16. Issue 6, 2021**

© А.А. Ковригин, М.Ю. Слесарев, 2021
Распространяется на основании Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC)

seeping, can potentially reduce the area, exposed to the impact, by 500 m.

Conclusions. It is recommended to install a cutoff wall in the west and a sorption curtain in the east in the course of recultivating Salaryevo landfill; this solution will ensure the containment of the leachate inside the landfill and prevent its spreading.

KEYWORDS: landfill of solid industrial and domestic waste, leachate, ground water, modeling, landfill reclamation, sorption curtains

FOR CITATION: Kovrigin A.A., Slesarev M.Yu. A change model of the hydraulic characteristics of the territory occupied by the landfill of solid industrial and domestic waste. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2021; 16(6):770-780. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.6.770-780 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Основным агентом воздействия полигонов твердых промышленных и бытовых отходов (ТПБО) на подземные и поверхностные воды является фильтрат. После попадания фильтрата от ТПБО в поток подземных вод его распространение происходит в водонасыщенной среде как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях.

Цель исследования — получение прогнозных данных изменения гидрогеологических характеристик территории полигона ТПБО «Саларьево». Для этого применили модельное воспроизведение существующих и прогнозируемых движений подземных вод на этапах рекультивации — построение имитационной модели [1, 2].

Источником исходных данных и материалов для построения имитационной модели изменения гидрогеологических условий послужил технический отчет по инженерно-экологическим изысканиям, выполненный АО «МосводоканалНИИпроект» в 2017 г. на территории полигона ТПБО «Саларьево» и в его окрестностях[1] [3].

Для определения эффективности предложенных технических решений по устройству противофильтрационных завес на этапах рекультивации полигона, а также для прогнозной оценки последующего влияния полигона на гидрогеологические условия АО «МосводоканалНИИпроект» была разработана математическая модель геофильтрационной системы с применением программного пакета Processing Modflow[2] [4]. На основании данных отчета прогноза изменения гидрогеологических условий выполнен расчет ореолов (зон) распространения фильтрата на территории полигона ТПБО «Саларьево»[3] [5] в различные периоды его работы: на 2017 г. и на 2042 г.[4] [6, 7].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Краткая характеристика полигона твердых бытовых отходов «Саларьево»

Полигон ТПБО «Саларьево» общей площадью 59 га расположен на территории поселения Московский, Троицкого и Новомосковского административных округов г. Москвы в промышленной зоне к югу от д. Саларьево [8, 9].

Полигон ТПБО организован в 1963 г. на месте карьера месторождения покровных суглинков, глубиной 1–3 м. Складирование отходов производилось по высотной схеме: средняя высота насыпи около 29 м, в отдельных точках насыпь достигала высоты 35 м. Общий объем складированных отходов составил 15 000 тыс. м^3.

На полигоне складировались твердые бытовые и промышленные отходы г. Москва и г. Видное, а также близлежащих городов и населенных пунктов.

В 2009 г. проведен первый этап рекультивации полигона, включающий: планировку территории, устройство систем сбора биогаза, фильтрата, отвода поверхностных вод [8, 9].

В рамках реализованного проекта рекультивации первого этапа не предусмотрена изоляция всей поверхности свалки. Рекультивированый полигон предназначен для выполнения долговременных природоохранных мероприятий по изоляции, хранению, контролю динамики уплотнения, минерализации подземных вод, газовыделению, для обеспечения санитарно-эпидемиологической, экологической безопасности населения от воздействия полигона [1, 2]. В соответствии с проектом рекультивации первого этапа учтено формирование упорядоченного ландшафта с целью дальнейшего использования полигона в качестве рекреационной зоны [8].

[1] Технический отчет по результатам инженерно-экологических изысканий. М. : АО «МосводоканалНИИпроект», 2017. Зарегистрировано АО «МосводоканалНИИпроект», с редакцией по замечаниям Москомэкспертизы. № 964-16-Д1891-ИЭИ. 443 с.

[2] Прогноз изменения гидрогеологических условий. М. : АО «МосводоканалНИИпроект», 2017. Объект исследования: полигон ТПБО «Саларьево», территории поселения Московский ТиНАО г. Москвы в промышленной зоне к югу от д. Саларьево. Отчет зарегистрирован АО «МосводоканалНИИпроект», № 964-16-Д1891ГГП. 44 с.

[3] ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. М. : Стандартинформ, 2019. 24 с.

[4] Заключение государственной экологической экспертизы по анализу техдокументации по Рекультивации полигона ТПБО «Саларьево», г. Москва, 2018. Зарегистрировано Департаментом федеральной службы по надзору в сфере природопользования по центральному федеральному округу, № 212-Э. 40 с.



Рис. 1. Схема расположения исследуемого участка — ситуационная карта

Fig. 1. The layout of the area under research, a planimetric map

Исследуемый район размещения полигона отходов производства и потребления имеет сложный характер:

- пересечения четвертичной, меловой, юрской систем отложений;
- литолого-генетическое строение кайнозойских и мезозойских отложений, представляющих собой переслаивание водовмещающих и водоупорных горизонтов;
- отмечается преобладание надморенного, межморенного и надъюрского водоносных горизонтов.

На территории депонирования полигона ТПБО, согласно заключению инженерно-геологических изысканий, выполненных АО «МосводоканалНИИпроект» в 2017 г., а также государственной экологической экспертизы 2018 г., наблюдается негативное воздействие от полигона на окружающую среду посредством выделения и распространения биогаза и фильтрата [4, 5].

На рис. 1, 2 приведены схема расположения исследуемого участка — ситуационная карта и объемно-планировочная модель полигона ТПБО «Саларьево». В табл. 1 показаны диапазоны высотных отметок поверхности.

Прогноз изменения гидрогеологических условий в результате реализации мероприятий по защите подземных вод от распространения фильтрата

Схематизация существующих гидрогеологических условий

При поступлении фильтрата от ТПБО в поток подземных вод миграция происходит в водонасыщенной среде, при этом распространение загрязнения происходит как в горизонтальном (преобладающем), так и в вертикальном направлениях [9–11].

В настоящее время для решения гидрогеохимических задач (исследования динамики миграционных процессов) наиболее широко применяемым инструментом является математическое моделирование, поскольку в натурных и лабораторных экспериментах процесс массопереноса загрязнения не может быть воспроизведен в реальном масштабе пространства и времени [12, 13].

С целью определения эффективности предлагаемых к реализации решений по устройству завес, а также установления области существующего распространения загрязнения с потоком подземных вод и прогнозной оценки дальнейшего влияния полигона на гидрогеологические условия исследуемой территории создана математическая модель конечно-разностной аппроксимации природно-техногенной геофильтрационной системы [4].

Модель составлена по результатам изысканий, выполненных сотрудниками АО «Мосводоканал-

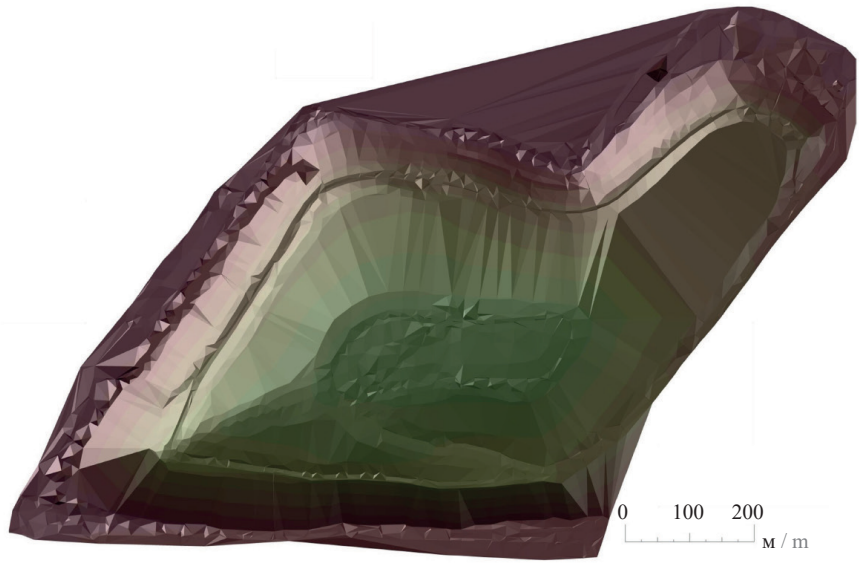


Рис. 2. Объемно-планировочная модель полигона ТПБО «Саларьево» (юго-западная изометрия)

Fig. 2. A 3D model of Salaryevo landfill (an isometric view from the south-west)

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

Табл. 1. Диапазоны высотных отметок поверхности (приложение к рис. 2)

Table. 1. Ranges of the surface elevation (an appendix to Fig. 2)

Номер диапазона Range number	Нижняя граница, м Bottom boundary, m	Верхняя граница, м Top boundary, m	Цвет Colour	Площадь 2Д, м^2 2D area, m^2
1	187,00	197,00		131 354,68
2	197,00	207,00		99 586,79
3	207,00	217,00		56 094,80
4	217,00	227,00		107 569,13
5	227,00	237,00		65 686,70
6	237,00	247,00		82 141,63
7	247,00	257,00		73 577,88
8	257,00	267,00		57 840,00

НИИпроект» в 2017 г., и по архивным данным инженерно-геологических изысканий разных лет, проведенных на территории вблизи полигона [3].

Математическое моделирование осуществлено с применением программного пакета Processing Modflow, предназначенного для трехмерного моделирования фильтрации и переноса загрязняющих веществ. Программа Processing Modflow часто используется для решения различных гидрогеологических задач и имеет специализированные средства для моделирования гидрогеологических условий территорий (наблюдательные скважины, реки/каналы, озера/пруды, перенос загрязняющих веществ и др.) [14–16].

Описание решения эпигнозной миграционной задачи

Для выявления распространения фильтрата от полигона ТПБО на основе геофильтрационной завесы построена геомиграционная модель на эпигнозный период работы объекта при помощи программы MT3DMS, которая входит в систему PMWin.

Решение миграционной эпигнозной задачи на срок с 1963 по 2017 гг. необходимо для определения максимально точного ореола распространения фильтрата от полигона ТПБО. Эпигнозное моделирование применимо при решении прямых задач по неявной схеме с использованием метода итераций (численный метод решения математических задач). Задача решалась применительно к установившемуся режиму, что дало оценку максимального эффекта от устройства противофильтрационной завесы на гидрогеологические условия выбранной территории [17, 18].

При построении модели полигон задан как источник загрязнения с постоянной величиной инфильтрации. Для данной модели закладывались параметры конвективно-дисперсионного переноса.

В качестве мигранта выбран нейтральный (несорбируемый, не инфильтрируемый грунтами) компонент, показывающий максимальное распространение загрязнения подземных вод фильтратом от полигона ТПБО [19–21].

В результате решения эпигнозной задачи выявлено, что по состоянию на 2017 г. ореол мигранта распространился в первом модельном слое в западном направлении на 400 м от западной границы полигона (рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка применения противофильтрационных завес при проведении работ по рекультивации полигона ТПБО

В целях оценки влияния устройства вертикальных противофильтрационных завес для предотвращения распространения фильтрата рассматриваются два варианта:

1) устройство противофильтрационных завес:
- с восточной стороны полигона;
- с восточной и западной сторон полигона;

2) устройство противофильтрационных завес с учетом сорбции мигрирующего фильтрата (предотвращения распространения фильтрата в устройстве завесы).

Таким образом, необходимо решить две прогнозные эпигнозные задачи:

1. Расчет вариантов по устройству противофильтрационной завесы как с восточной стороны от полигона, так и в комплексе с проектируемой завесой на западной стороне — фильтрационной.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6, 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6, 2021

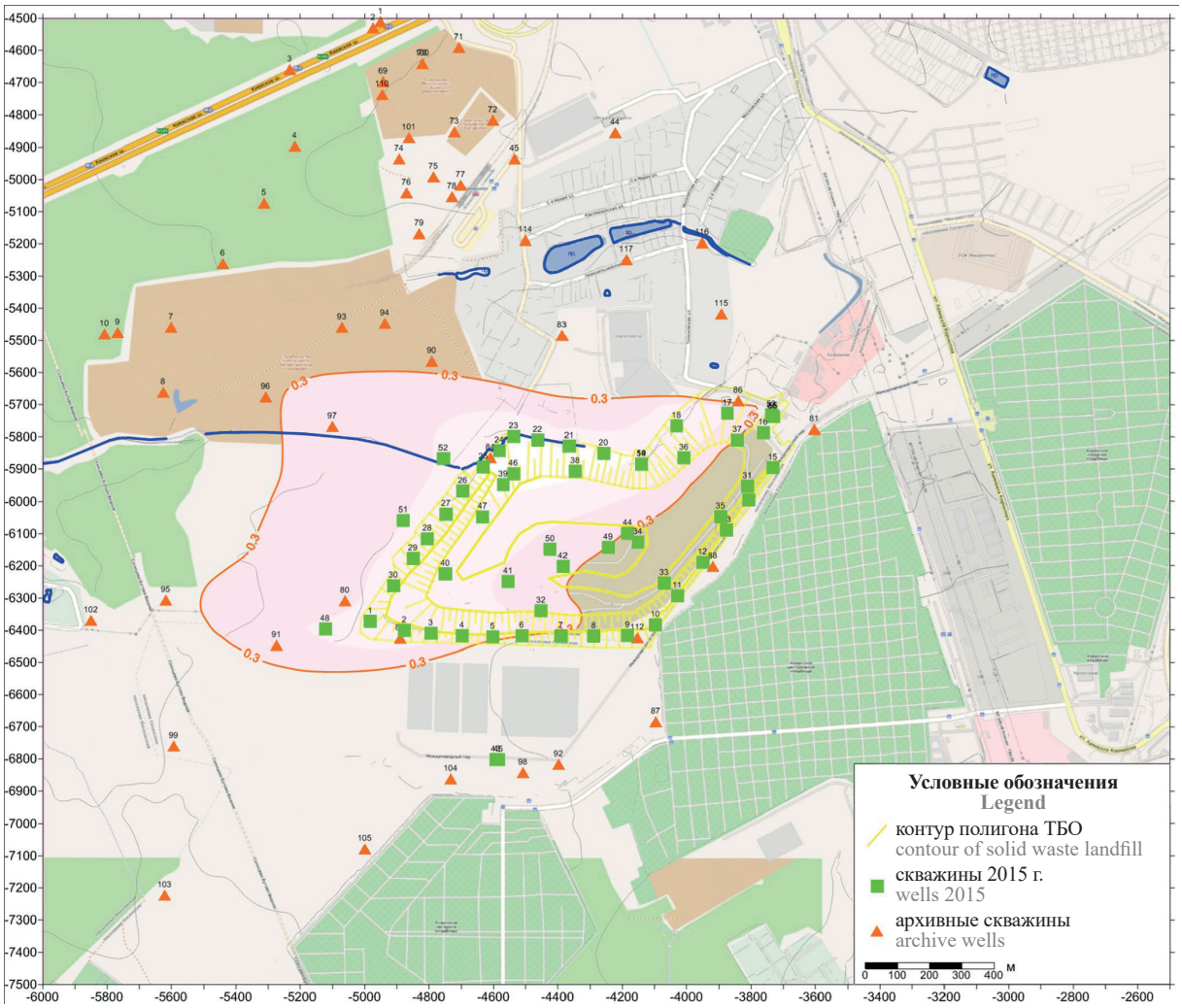


Рис. 3. Ореол распространения мигранта (нейтральный несорбируемый компонент) в 2017 г.

Fig. 3. The migrant (neutral non-sorbing component) halo in 2017

2. Миграционная задача включает в себя решение с сорбирующей противофильтрационной завесой на западе, что позволит получить сравнительную оценку прогнозного распространения фильтрата с учетом предотвращения повышения уровня подземных вод.

В табл. 2 представлены рассматриваемые прогнозные задачи — фильтрационная и миграционная.

Табл. 2. Рассматриваемые прогнозные задачи

Table 2. Future-oriented objectives

Варианты прогнозных задач Options of future-oriented objectives	
Фильтрационная задача Filtration-focused objective	1. Устройство завесы с восточной стороны полигона 1. Arrangement of a cutoff wall on the east side of the landfill
	2. Устройство завес с восточной и западной сторон полигона 2. Arrangement of cutoff walls on the east and west sides of the landfill
Миграционная задача Migration-focused objective	3. Устройство завес по варианту 2 с учетом сорбции мигранта завесой 3. Arrangement of cutoff walls (Option 2) with regard for the sorption of the migrant by the cutoff wall

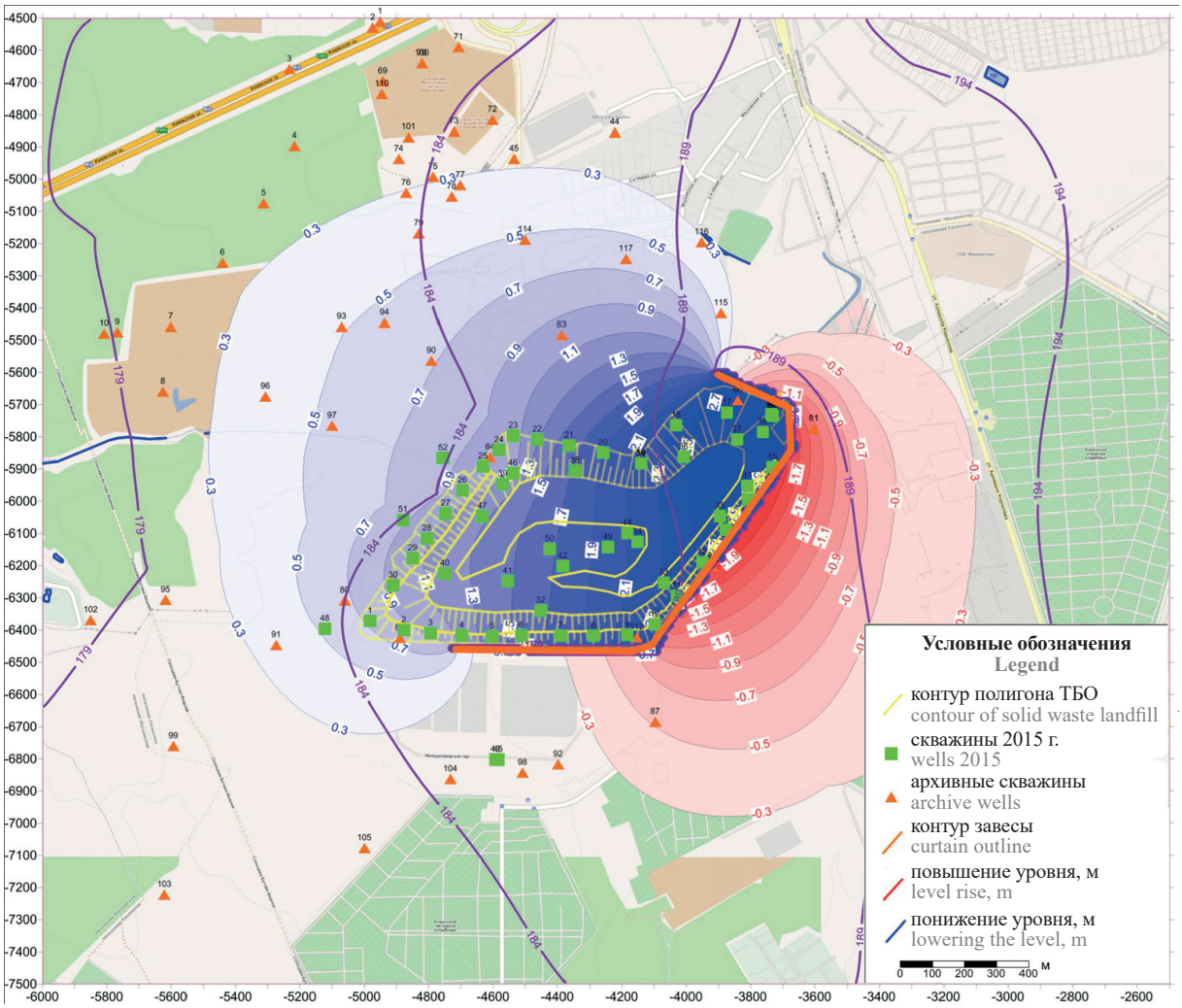


Рис. 4. Распространение изменения уровня водовмещающего слоя надморенного горизонта; прогнозное поле уровней надморенного горизонта в результате устройства противофильтрационной завесы с восточной стороны полигона (красные контуры — повышение уровня, синие — понижение)

Fig. 4. Changes in the level of the water-bearing layer of the super-moraine horizon; the forecast field of the levels of the super-moraine horizon as a result of installation of a cutoff wall on the east side of the landfill (red contour lines stand for the level increase, blue lines denote the level reduction)

Устройство завесы с восточной стороны полигона (вариант 1)

Для решения прогнозных задач были приняты следующие исходные данные:

• начальные условия взяты с карт гидроизогипс (линии, соединяющие точки зеркала грунтовых вод) водоносных горизонтов из технического отчета инженерно-гидрогеологических изысканий АО «МосводоканалНИИпроект» [3];

• модельные коэффициенты фильтрации водовмещающих (Кф = 1,2 м/сут) и водоупорных (Кф = 3,0 м/сут) отложений подобраны в соответствии с ГОСТ 25584-2016 [5] к фактически преобладающим грунтам на основании проведенных изысканий АО «МосводоканалНИИпроект» [3, 4].

При рассмотрении максимального подпора водных масс (воздействия подземных вод на противофильтрационные завесы), как наиболее неблагоприятных условий, на модели внутри контура проектируемых завес на мощность первого модельного слоя приняты нулевые значения водопроводимости (отсутствия пропускной способности подземных вод).

На основании вышеприведенных исходных данных повышение уровня водосодержания в водонасыщенном слое горизонта расположения грунтовых вод в тыловой, относительно потока подземных вод, части объекта, наблюдается с восточной стороны полигона. Максимально ожидаемое повышение составит 2,3 м. Зона влияния повышения (до 0,5 м) распространится в юго-восточном направлении на 600 м (рис. 4).

Максимальное понижение водонасыщенного водоносного горизонта составит до 3,2 м вблизи западной стороны проектируемой завесы. Зона влияния повышения (до 0,5 м) распространится в северо-восточном направлении ориентировочно на 580 м от западной границы полигона.

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6. 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6. 2021

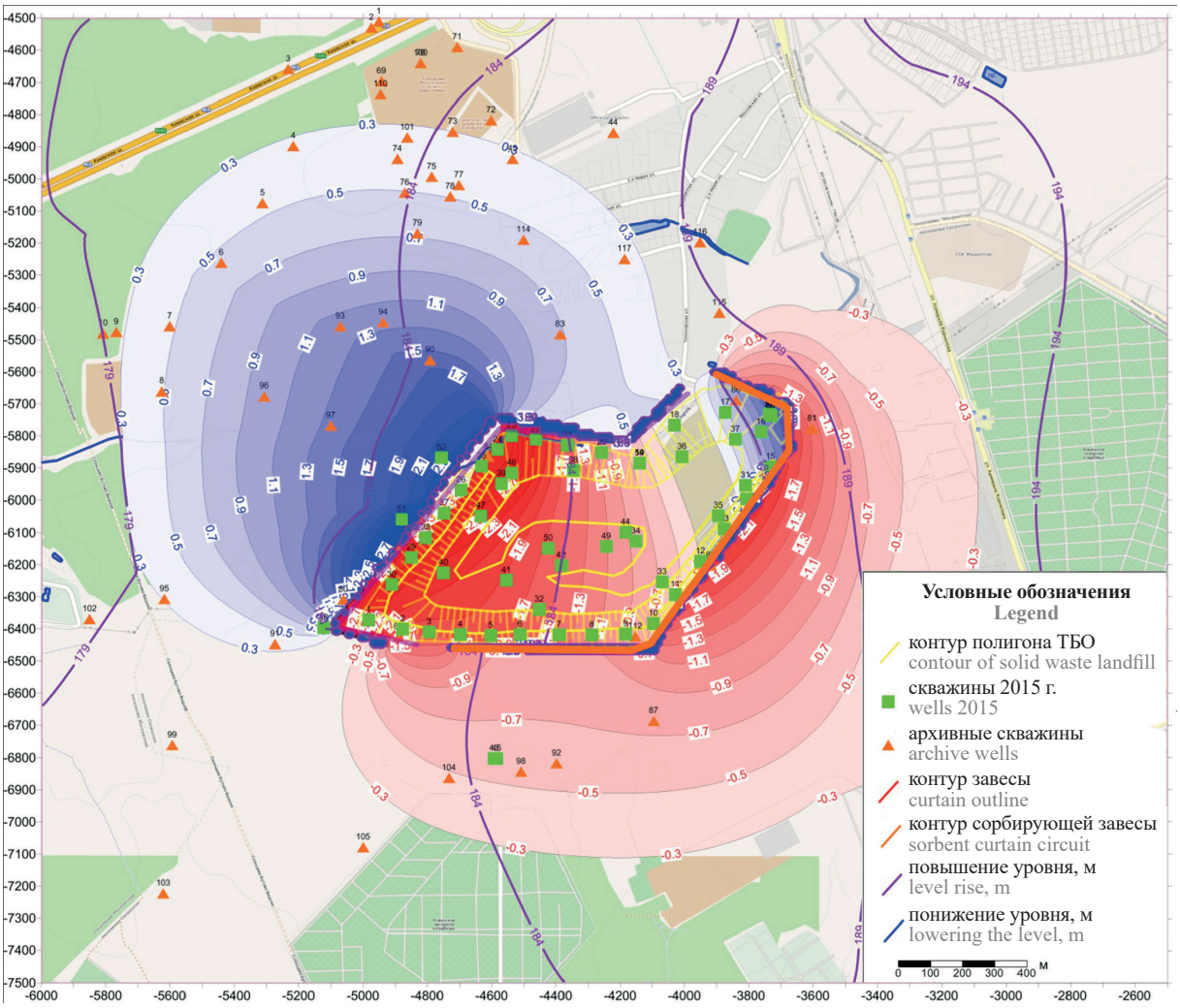


Рис. 5. Распространение изменения уровня водовмещающего слоя надморенного горизонта; прогнозное поле уровней надморенного горизонта в результате устройства противофильтрационных завес западной и восточной сторон полигона (красные контуры — повышение уровня, синие — понижение)

Fig. 5. Changes in the level of the water-bearing layer of the super-moraine horizon; the forecast field of levels of the super-moraine horizon as a result of installation of cutoff walls on the east and west sides of the landfill (red contour lines stand for the level increase, blue lines denote the level reduction)

Полученные значения сопоставляются с сезонным колебанием уровня грунтовых вод.

Устройство фильтрационных завес с восточной и западной сторон от полигона (вариант 2)

В этом варианте задачи исходные данные являются аналогичными с рассмотренными в варианте 1. Фильтрационная завеса с западной стороны задана без учета пропускной способности фильтрата (без учета сорбирующей функции). Восточная завеса принята с аналогичной конфигурацией, без учета пропускной способности фильтрата, как и в варианте 1.

При такой конфигурации наблюдается подъем уровня надморенного горизонта не только с восточной стороны полигона, а также и внутри контура на величину до 2,5 м, что может вызвать повышение уровня водных масс с фильтратом с последующим образованием застойной области в контуре с возрастающей концентрацией фильтрата. Зона влияния повышения уровня водных масс (до 0,5 м) распространится в юго-восточном направлении ориентировочно на 600 м (рис. 5) от восточной границы контура полигона. Понижение уровня водовмещающего слоя надморенного горизонта с западной стороны от объекта отмечается на величину 2,5 м. Зона влияния понижения уровня водных масс (до 0,5 м) распространится в западном направлении ориентировочно на 900 м от западной границы полигона (рис. 6) [3].

Устройство фильтрационных завес с восточной и западной сторон от полигона с учетом сорбирующей функции противофильтрационных завес (вариант 3)

Для оценки эффективности варианта 3, включающего противофильтрационные завесы в восточной и западной частях полигона, выполнено

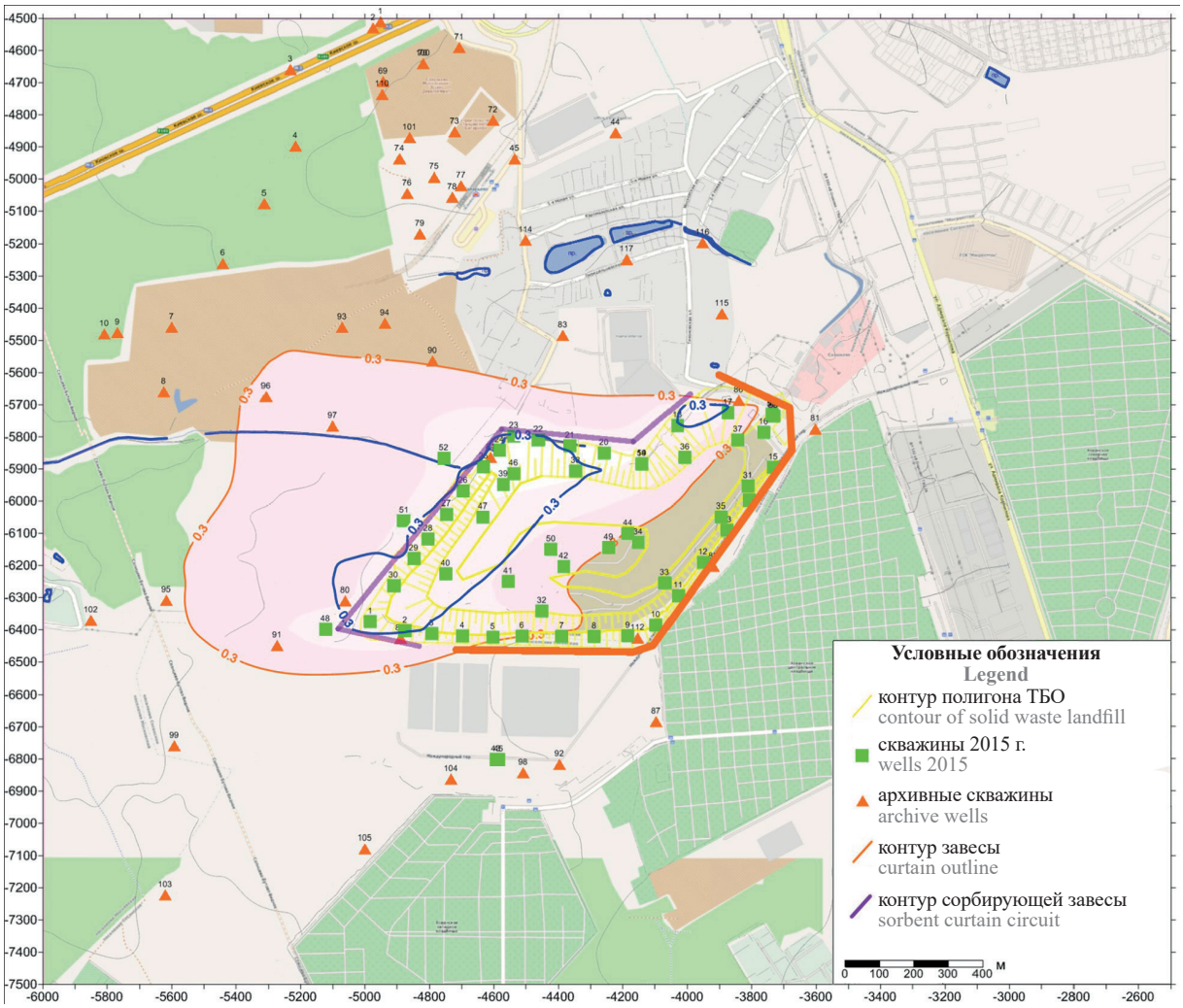


Рис. 6. Ореолы распространения фильтрата на 2042 г. с учетом сорбирующей завесы (синий контур) и без нее (красный контур)

Fig. 6. Lecheate halos through 2042 with regard for a sorbing curtain (the blue contour) and without it (the red contour)

прогнозное миграционное моделирование, в основе которого лежит решение эпигнозной задачи по распространению фильтрата. Исходные данные для моделирования:

• начальные условия приняты с карт гидроизогипс водоносных горизонтов, взятых из технического отчета инженерно-гидрогеологических изысканий АО «МосводоканалНИИпроект» [3];

• модельные коэффициенты фильтрации водовмещающих (Кф = 1,2 м/сут) и водоупорных (Кф = 3,0 м/сут) отложений подобраны в соответствии с ГОСТ 25584-2016 [7] к фактически преобладающим грунтам на основании проведенных изысканий АО «МосводоканалНИИпроект» [4];

• коэффициент пропускной способности фильтрата (сорбирующей функции) противофильтрационной завесы принят равным нулю;

• период прогнозной задачи задан равным 25 годам, с 2017 до 2042 гг. На рис. 5 представлены результаты решения данного варианта.

На основании полученных результатов можно заключить, что при устройстве противофильтрационных сорбирующих завес с целью предотвращения распространения фильтрата прогнозно удается сократить разницу по распространению в плане до 500 м (по контуру 0,3) (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основываясь на информации, полученной при построении имитационной модели изменения гидрогеологических условий полигона ТПБО и прилегающей к нему территории, можно сделать вывод о верно подобранном техническом решении по устройству завес, позволяющем значительно снизить негативное воздействие от полигона на подземные воды.

С целью определения эффективности предложенных технических решений по минимизации влияния объекта на окружающую среду, а также прогнозной оценки влияния полигона на подземные воды и грунты проанализирована математическая модель конечно-разностной аппроксимации природно-

Вестник МГСУ • ISSN 1997-0935 (Print) ISSN 2304-6600 (Online) • Том 16. Выпуск 6. 2021
Vestnik MGSU • Monthly Journal on Construction and Architecture • Volume 16. Issue 6. 2021

техногенной геофильтрационной и геомиграционной систем. Геофильтрационная модель решена для двух вариантов мероприятий по защите подземных вод. Первый вариант — устройство противофильтрационной завесы с восточной стороны полигона, второй — создание противофильтрационной и сорбирующей завес с восточной и западной сторон от объекта.

В результате решения двух прогнозных эпигнозных задач — расчет вариантов устройства противофильтрационных завес и миграционной задачи — возможно сделать заключение: при рекультивации полигона ТПБО «Саларьево» рекомендуемым к реализации является вариант с устройством как противофильтрационной завесы на востоке, так и сорбирующей завесы на западе от полигона ТПБО. Предложенное техническое решение позволит сконцентрировать фильтрат внутри полигона и будет препятствовать его распространению.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Слесарев М.Ю., Теличенко В.И.* Обзор норм, методов и моделей геоэкологии в аспектах проблем «зеленой» стандартизации строительства // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 1. С. 42–46. DOI: 10.31857/S0869780920010184

2. *Теличенко В.И., Слесарев М.Ю.* «Зеленая» стандартизация технологий формирования природоподобной среды жизнедеятельности // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. № 5 (116). С. 558–567. DOI: 10.22227/1997–0935.2018.5.558-567

3. *Гончарук В.В., Шкавро З.Н., Бадеха В.П., Кучерук Д.Д., Сова А.Н., Бадеха А.В.* Комплексная очистка сточных вод свалок твердых бытовых отходов // Химия и технология воды. 2007. Т. 29. № 1. С. 55–66.

4. *Королев В.А.* Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем. М. : Университет, 2007. 41 с.

5. *Косинова И.И., Сапронов Р.С.* Подземные воды. Основные загрязняющие вещества, источники и виды загрязнения // Проблемы экологии и экологической безопасности центрального Черноземья Российской Федерации : мат. XI Междунар. науч.-практ. конф. Липецк, 2007. С. 42–47.

6. *Жернов И.Е., Павловец И.Н.* Моделирование фильтрационных процессов. Киев : Вища школа, 1976. 192 с.

7. *Прудовский Э.Л.* Количественное и качественное состояние подземных вод Липецкой области. Липецк : Липецкий филиал ФГУ ТФИ, 2007. 58 с.

8. *Чертес К.Л., Тупицына О.В., Мартыненко Е.Г., Смородин Д.В., Быков Д.Е., Слесарев М.Ю.* Геоэкологическая оценка нарушенных территорий и их восстановление материалами на основе крупнотоннажных шламовых отходов // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 10. С. 38–43. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-10-38-43

9. *Slesarev M.* Environmental graphic method for creating area of permissible impact // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 022055. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022055

10. *Slesarev M.* Mathematical modeling of environmental loads at stages of construction object // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 365. P. 022038. DOI: 10.1088/1757-899x/365/2/022038

11. *Slesarev M.* The computer modeling concept in the paradigm of Green Standardization of ecological construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. P. 012126. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012126

12. *Slesarev M.* Graph-analytic model of parameters of unified construction products on the requirements of environmental safety // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456. P. 012125. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012125

13. *Щербина Е.В.* Научно-методологические основы геоэкологического проектирования полигонов твердых бытовых отходов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2005. 39 с.

14. *Hansen H.K., Ottosen L.M., Hansen L., Kliem B.K., Villimsen A., Bech-Nielsen G.* Electrodialytic remediation of soil polluted with heavy metals. key parameters for optimization of the process // ICHEME Symposium Series. 1999. Vol. 145. Pp. 201–209.

15. *Плаксицкая И.П.* Геоэкологическая типизация полигонов твердых бытовых и промышленных малотоксичных отходов : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Воронеж, 2010. 23 с.

16. *Ноздря В.И., Мазыкин С.В., Мнацаканов В.А., Баранихин Е.В., Бержец М.С.* Опыт практической реализации комплексного подхода к обращению с отходами бурения в регионах Крайнего Севера // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2015. № 2. С. 30–33.

17. *Бусел А.В.* Переработка техногенных отходов и их использование в строительной индустрии // Информационно-аналитический журнал «Новости науки и технологий». 2012. № 3 (22).

18. *Воробьева С.Ю., Шпинькова М.С., Мерициди И.А.* Переработка нефтешламов, буровых шламов, нефтезагрязненных грунтов методом реагентного капсулирования // Территория нефтегаз. 2011. № 2. С. 68–71.

19. *Чертес К.Л., Тупицына О.В., Пыстин В.Н., Ермаков В.В., Раменская Е.В., Штеренберг А.М.* Геоэкологическое обоснование освоения накопителей шламов ЖКХ методом обработки многомерных данных // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 88–101. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.6.88-102

20. *Воробьева С.Ю., Мерициди И.А., Шпинькова М.С.* Подбор рецептуры обезвреживания шламов методом реагентного капсулирования // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. 2013. № 1 (270). С. 45–57.

21. *Тупицына О.В., Чертес К.Л., Быков Д.Е.* Освоение природно-техногенных систем градопромышленных агломераций : монография. Самара : ООО «Издательство Ас Гард», 2014. 336 с.

Поступила в редакцию 10 апреля 2021 г.
Принята в доработанном виде 2 июня 2021 г.
Одобрена для публикации 2 июня 2021 г.

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

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

REFERENCES

1. Slesarev M.Yu., Telichenko V.I. Review of geoecological standards, methods and models in the view of “green” standardization of construction. *Geoekologiya. Inzheneraya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya.* 2020; 1:42-46. DOI: 10.31857/S0869780920010184 (rus.).

2. Telichenko V.I., Slesarev M.Yu. “Green” standardization of technologies for forming the nature-friendly living environment. *Vestnik MGSU* [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13:5(116):558-567. DOI: 10.22227/1997–0935.2018.5.558-567 (rus.).

3. Goncharuk V.V., Shkavro Z.N., Badekha V.P., Kucheruk D.D., Sova A.N., Badekha A.V. Integrated wastewater treatment of municipal solid waste landfills. *Chemistry and Technology of Water*. 2007; 29(1):55-66. (rus.).

4. Korolev V.A. *Monitoring of geological, lithotechnical and ecological-geological systems*. Moscow, Universitet, 2007; 416. (rus.).

5. Kosinova I.I., Sapronov R.S. Underground waters. The main pollutants. Sources and types of pollution. *Problems of ecology and ecological safety of the central Chernozem region of the Russian Federation : Materials of the XI International Scientific-Practical Conference*. Lipetsk, 2007; 42-47. (rus.).

6. Zhernov I.E., Pavlovets I.N. *Models of filtration processes.* Kiev, Higher School, 1976; 192. (rus.).

7. Prudovsky E.L. *Quantitative and qualitative state of underground waters of the Lipetsk region*. Lipetsk, Lipetsk Branch of FSU TFI, 2007; 58. (rus.).

8. Chertes K.L., Tupitsyna O.V., Martynenko E.G., Smorodin D.V., Bykov D.E., Slesarev M.Yu. Geoecological assessment of disturbed territories and their restoration with materials based on large-capacity sludge waste. *Ecology and Industry of Russia.* 2017; 21(10):38-43. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-10-38-43 (rus.).

9. Slesarev M. Environmental graphic method for creating area of permissible impact. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:022055. DOI: 10.1088/1757-899X/365/2/022055

10. Slesarev M. Mathematical modeling of environmental loads at stages of construction object. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:022038. DOI: 10.1088/1757-899x/365/2/022038

11. Slesarev M. The computer modeling concept in the paradigm of Green Standardization of ecological construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2018; 456:012126 DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012126

12. Slesarev M. Graph-analytic model of parameters of unified construction products on the requirements of environmental safety. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2018; 456:012125. DOI: 10.1088/1757-899X/456/1/012125

13. Shcherbina E.V. *Scientific and methodological bases of geoecological design of solid waste landfills : abstract dis. ... doctor of technical sciences.* Moscow, 2005; 39. (rus.).

14. Hansen H.K., Ottosen L.M., Hansen L., Kliem B.K., Villimsen A., Bech-Nielsen G. Electrodialytic Remediation of Soil Polluted with Heavy Metals. Key Parameters for Optimization of the Process. *ICHEME Symposium Series*. 1999; 145:201-209.

15. Plaksitskaya I.P. *Geoecological typification of landfills of solid household and industrial low-toxic*

waste : abstract dis. ... candidate of geographical sciences. Voronezh, 2010; 23. (rus.).

16. Nozdrya V.I., Mazykin S.V., Mnatsakanov V.A., Baranikhin E.V., Berzhets M.S. Experience of practical implementation of an integrated approach to the treatment of drilling waste in the regions of the Far North. *Bulletin of the Association of Drilling Contractors.* 2015; 2:30-33. (rus.).

17. Busel A.V. Processing of technogenic waste and their use in the construction industry. *Information and analytical journal "News of Science and Technology".* 2012; 3(22). (rus.).

18. Vorob'eva S.Yu., Shpin'kova M.S., Meritsidi I.A. Processing of oil sludge, drill cuttings, oil-contaminated soils by the method of reagent capsulation. *Oil and Gas Territory*. 2011; 2:68-71. (rus.).

19. Chertes K.L., Tupitsyna O.V., Pystin V.N., Ermakov V.V., Ramenskaya E.V., Shterenberg A.M. Geoecological rationale of the development of housing and communal services sludge storages by the method of multidimensional data processing. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 6:88-102. DOI: 10.22227/1997-0935.2015.6.88-102 (rus.).

20. Vorobieva S.Y., Meritsidi I.A., Shpinkova M.S. Selecting recipes of sludge disposal by reagent encapsulation method. *Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas.* 2013; 1(270):45-57. (rus.).

21. Tupitsyna O.V., Chertes K.L., Bykov D.E. *Development of natural-technogenic systems of urban-industrial agglomerations : monograph.* Samara, LLC "Publishing House As Gard", 2014; 336. (rus.).

Received April 10, 2021.
Adopted in revised form on June 2, 2021.
Approved for publication on June 2, 2021.

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

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

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Текст статьи набирается в файлах в формате .docx.

СТРУКТУРА НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Научная статья должна состоять из следующих структурных элементов: заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, основной текст, сведения об авторах, список литературы.

Заголовок, список авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы указываются последовательно на русском и английском языках.

Заголовок к статье должен соответствовать основному содержанию статьи. Заголовок статьи должен кратко (не более 10 слов) и точно отражать объект, цель и новизну, результаты проведенного научного исследования. Он должен быть информативным и отражать уникальность научного творчества автора.

Список авторов в краткой форме отражает всех авторов статьи и указывается в следующем формате:

И.О. Фамилия[1], И.О. Фамилия[2]

[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 нею, 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 (***a***, ***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 издания-

ми), отчеты, а также источники, отсутствующие в каталогах ведущих российских библиотек-депозитариев (ГПНТБ, РНБ, РГБ), архивах и т.п. Подобные источники приводят в сносках внизу страницы сверх минимально рекомендуемого порога.

Не рекомендуется ссылаться на интернет-ресурсы, не содержащие научную информацию, учебники, учебные и методические пособия. В числе источников должно быть не менее 10 иностранных источников (для статей на английском языке не менее трех российских). Не менее шести из иностранных и не менее шести из российских источников должны быть включены в один из ведущих индексов цитирования: Web of Science/Scopus или Ядро РИНЦ. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее восьми статей из научных журналов не старше 10 лет, из них четыре — не старше трех лет. В списке источников должно быть не более 10 % работ, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Материалы и методы (Materials and methods). Отражает то, как изучалась проблема. Описываются процесс организации эксперимента, примененные методики, обосновывается их выбор. Детализация описания должна быть настолько подробной, чтобы любой компетентный специалист мог воспроизвести их, пользуясь лишь текстом статьи.

Результаты (Result). В разделе представляется систематизированный авторский аналитический и статистический материал. Результаты проведенного исследования необходимо описывать достаточно полно, чтобы читатель мог проследить его этапы и оценить обоснованность сделанных автором выводов. Это основной раздел, цель его — при помощи анализа, обобщения и разъяснения данных доказать рабочую гипотезу (гипотезы). Результаты при необходимости подтверждаются иллюстрациями (таблицами, графиками, рисунками), которые представляют исходный материал или доказательства в свернутом виде. Важно, чтобы проиллюстрированная информация не дублировала уже приведенную в тексте. Представленные в статье результаты сопоставляются с предыдущими работами в этой области как автора, так и других исследователей.

Заключение (Conclusion and discussion) содержит краткую формулировку результатов исследования. В нем в сжатом виде повторяются главные мысли основной части работы. Повторы излагаемого материала лучше оформлять новыми фразами, отличающимися от высказанных в основной части статьи. В этом разделе необходимо сопоставить полученные результаты с обозначенной в начале работы целью. В заключении суммируются результаты осмысления темы, делаются выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, подчеркивается их практическая значимость, а также определяются основные направления для дальнейшего исследования в этой области. В заключительную часть статьи желательно включить попытки прогноза развития рассмотренных вопросов.

КАК ОФОРМИТЬ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список литературы на русском языке оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Образец:

Литература

1. Голицын Г.С. Парниковый эффект и изменения климата // Природа. 1990. № 7. С. 17–24.

2. Шелушинин 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. Фамилия[1], **И.О. Фамилия**[2,…]

[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. Фамилия[1], **И.О. Фамилия**[2,…] 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 тепломассопереноса 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.

Bionotes: **Имя, отчество, фамилия** (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты;

Имя, отчество, фамилия (полностью) — ученая степень, ученое звание, должность, подразделение; **название организации** (обязательно приводить в полной и краткой официально установленной форме), в которой работает (учится) автор; почтовый адрес организации (в последовательности: офис, дом, улица, город, индекс, страна); адрес электронной почты.

ВНИМАНИЕ! Все названия, подписи и структурные элементы рисунков, графиков, схем, таблиц оформляются на русском и английском языках.

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001
(наименование получателя платежа)

7	7	1	6	1	0	3	3	9	1

(ИНН получателя платежа)

0	3	2	1	4	6	4	3	0	0	0	0	0	0	0	1	7	3	0	0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО БИК | 0 | 0 | 4 | 5 | 2 | 5 | 9 | 8 | 8 |
(наименование банка получателя платежа)

КБК | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 |

ОКТМО | 4 | 5 | 3 | 6 | 5 | 0 | 0 | 0 |

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь 2021 г.

Вестник МГСУ
(наименование платежа) (номер лицевого счета (код) плательщика)

И з в е щ е н и е

Кассир

Ф.И.О плательщика _____

Адрес плательщика _____

Сумма платежа **3 822** руб. **00** коп. Сумма платы за 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 _____

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001
(наименование получателя платежа)

7	7	1	6	1	0	3	3	9	1

(ИНН получателя платежа)

0	3	2	1	4	6	4	3	0	0	0	0	0	0	0	1	7	3	0	0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО БИК | 0 | 0 | 4 | 5 | 2 | 5 | 9 | 8 | 8 |
(наименование банка получателя платежа)

КБК | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 |

ОКТМО | 4 | 5 | 3 | 6 | 5 | 0 | 0 | 0 |

Вестник МГСУ - 637.00 руб. х 6 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь 2021 г.

Вестник МГСУ
(наименование платежа) (номер лицевого счета (код) плательщика)

Квитанция

Кассир

Ф.И.О плательщика _____

Адрес плательщика _____

Сумма платежа **3 822** руб. **00** коп. Сумма платы за 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 _____

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/

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7	7	1	6	1	0	3	3	9	1

(ИНН получателя платежа)

0	3	2	1	4	6	4	3	0	0	0	0	0	0	0	1	7	3	0	0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО БИК | 0 | 0 | 4 | 5 | 2 | 5 | 9 | 8 | 8 |

(наименование банка получателя платежа)

КБК | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 |

ОКТМО | 4 | 5 | 3 | 6 | 5 | 0 | 0 | 0 |

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2021 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа) (номер лицевого счета (код) плательщика)

Извещение

Кассир

Ф.И.О плательщика _____

Адрес плательщика _____

Сумма платежа **6 880** руб. **00** коп. Сумма платы за 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 _____

Форма № ПД-4

УФК по г. Москве г. Москва (НИУ МГСУ, л/с 20736Х29560) КПП 771601001

(наименование получателя платежа)

7	7	1	6	1	0	3	3	9	1

(ИНН получателя платежа)

0	3	2	1	4	6	4	3	0	0	0	0	0	0	0	1	7	3	0	0

(номер счета получателя платежа)

в ГУ Банка России по ЦФО БИК | 0 | 0 | 4 | 5 | 2 | 5 | 9 | 8 | 8 |

(наименование банка получателя платежа)

КБК | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 |

ОКТМО | 4 | 5 | 3 | 6 | 5 | 0 | 0 | 0 |

Вестник МГСУ - 573.34 руб. х 12 экз.
подписка на январь, февраль, март, апрель, май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь, ноябрь, декабрь 2021 г.

Вестник МГСУ

(наименование платежа) (номер лицевого счета (код) плательщика)

Квитанция

Кассир

Ф.И.О плательщика _____

Адрес плательщика _____

Сумма платежа **6 880** руб. **00** коп. Сумма платы за 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 _____

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/